

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО”**

Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

«До захисту допущено»

УДК 537.6:537.8

Завідувач кафедри

Котовський В.Й.

(підпис)

(прізвище, ім'я, по батькові)

“ ” 20__ р.

Магістерська дисертація

з напрямку підготовки (спеціальності) 104 фізика та астрономія

на тему: **«Комп'ютерне моделювання взаємодії високо коерцитивних магнітів
у різних середовищах моделювання»**

Виконав: студент (-ка) групи 2 курсу магістерського рівня, групи ОФ-81мп

(шифр групи)

Башкатов Олег Владиславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.фіз-мат. н., проф. Бродин О.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент проф. Решетняк С.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ фізико-математичний
(повна назва)

Кафедра _____ загальної фізики та фізики твердого тіла
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
(освітньо-науковою) програмою

Спеціальність (спеціалізація) _____ 104 – фізика та астрономія (комп'ютерне
моделювання фізичних процесів)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. Й. Котовський
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Башкатову Олегу Владиславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації **«Комп'ютерне моделювання взаємодії високо
коерцитивних магнітів у різних середовищах моделювання»**

Науковий керівник дисертації _____ д.фіз-мат. н., проф. Бродин О.М.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 11.12.2019

3. Об'єкт дослідження Магнітні властивості взаємодії високо
коерцитивних постійних магнітів

4. Предмет дослідження Вплив різних, (за кількістю, за розмірами, за
магнітними характеристиками) магнітних систем на взаємодію та
комп'ютерне моделювання таких систем

4. Перелік завдань, які потрібно розробити дослідження комп'ютерного моделювання у різних середовищах моделювання; створення нової моделі магнітного підвісу; розрахунок і відображення конфігурації магнітного поля систем магнітів та магнітних підвісів.
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу моделювання у різних середовищах, види магнітних речовин, магнітна взаємодія декількох магнітів, орієнтація магнітних диполей, можливі варіанти реалізації магнітного підвісу та магнітний підшипників, комп'ютерне моделювання у програмі Comsol та Femm, залежність сили взаємодії від розташування магнітів у площині, візуалізація магнітного підвісу.
6. Орієнтовний перелік публікацій Патентна заявка «Магнітний підвіс», Лабораторна робота 1-12 «Вивчення взаємодії високо коерцитивних магнітів»
7. Дата видачі завдання 02.09.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці.	02.09.19-03.09.19	
2	Ознайомлення з місцем роботи та засвоєння рекомендацій про виконання програми практики.	03.09.19-05.09.19	
3	Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури	06.09.19-16.09.19	
4	Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування	17.09.19-25.09.19	
5	Наукові дослідження за темою МД	26.09.19-4.11.19	
6	Складання заліку з науково-дослідної практики	5.11.19	
7	Аналіз отриманих результатів	6.11.19-12.11.19	
8	Підготовка розділів МД на основі отриманих даних по темі МД	13.11.19-25.11.19	
9	Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту	25.11.19-27.11.19	
10	Надання роботи на перевірку	28.11.19	

	керівнику МД		
11	Отримання відгуку від керівника МД	30.11.19	
12	Перевірка МД на плагіат	05.12.19	
13	Формування плану публікацій по темі МД або документів по впровадженню (лист з підприємства або подання проекту впровадження в «КПІ ім. Ігоря Сікорського»)	06.12.19-09.12.19	
14	Подання МД на рецензію	10.12.19	
15	Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД)	11.12.19	
16	Попередній захист МД	11.12.19	
17	Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті	11.12.19-16.12.19	
18	Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі загальної фізики та ФТТ	17.12.19	
19	Відсилання анотації МД на сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	17.12.19-18.12.19	
20	Остаточний захист МД	19.12.19	
21	Відсилання матеріалів МД у бібліотеку «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та сайт кафедри загальної фізики та ФТТ	20.12.19	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми На сьогоднішній день, магнітні системи, добре зарекомендували себе, як засіб полегшення фізичних впливів та зменшення сил тертя, що приводить до подовження ресурсу конструкції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами Взаємодія високо коерцитивних магнітів, фізика надпровідності, магнітна левітація, магнітні підшипники та підвіси.

Об'єкт дослідження Магнітні властивості взаємодії високо коерцитивних постійних магнітів.

Предмет дослідження Вплив різних, (за кількістю, за розмірами, за магнітними характеристиками) магнітних систем на взаємодію та комп'ютерне моделювання таких систем.

Мета роботи розробити модель системи постійних магнітів, за допомогою якого можна контролювати взаємодію між ними та створити умови для реалізації магнітного підвісу.

Методи дослідження науковий метод дослідження , аналітичне дослідження поставленої задачі і її моделювання за допомогою комп'ютерних програм фізичного моделювання.

Задачі дослідження Розробити візуальну модель взаємодії постійних магнітів та магнітний підвіс, та розрахунок сил взаємодії

Наукова новизна одержаних результатів За допомогою програм фізичного моделювання, вдалося створити магнітний підвіс, з мінімальним горизонтальним биттям.

Практичне значення одержаних результатів Отримані результати, дають можливість створення магнітного підвісу, без механічного тертя, або магнітного горизонтального підшипника.

Публікації Створена патентна заявка за назвою «Магнітний підвіс», а також створена лабораторна робота «Вивчення взаємодії постійних магнітів»

Ключові слова магніти, магнітне поле, левітація, магнітний підвіс, взаємодія магнітів.

В роботі наведено: використаної літератури - 79 , сторінок: - 82 , рисунків - 61 , таблиць -0.

ABSTRACT

Actuality of theme To date, magnetic systems have proven themselves as a means of alleviating physical effects and reducing friction, resulting in the extension of structural life.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes Interaction of highly coercive magnets, superconductivity physics, magnetic levitation, magnetic bearings and suspensions.

Object of research Magnetic properties of the interaction of highly coercive permanent magnets.

Subject of research Influence of different (by number, size, magnetic characteristics) magnetic systems on the interaction and computer simulation of such systems.

Purpose of work to develop a model of a permanent magnet system that can be used to control the interaction between them and create the conditions for the magnetic suspension.

Research methods scientific method of research, analytical research of a given task and its modeling by means of computer programs of physical modeling.

Tasks of research To develop a visual model of interaction of permanent magnets and magnetic suspensions, and calculation of interaction forces

Scientific novelty of the results With the help of physical simulation programs, it was possible to create a magnetic suspension, with minimal horizontal beating

The practical significance of the results The results obtained make it possible to create a magnetic suspension, without mechanical friction, or a magnetic horizontal bearing.

Publications A patent application for the name "Magnetic Suspension" was created, as well as a laboratory work "Study of the interaction of permanent magnets"

Keywords magnets, magnetic field, levitation, magnetic suspension, interaction of magnets.

The article contains: used literature - 79 , pages: - 82 , pictures - 61.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ.....	5
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ I. Основи моделювання.....	10
1.1 Моделювання як метод наукового дослідження.....	10
1.2 Види моделювання	11
1.3 Опис середовища Comsol Multiphysics.....	16
1.4 Опис середовища Femm.....	19
1.5 Опис середовища Elcut.....	23
1.6 Опис середовища AsnsysMaxwell.....	25
1.7 Порівняння програм для моделювання.....	29
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ I.....	29
РОЗДІЛ II. Теоретична частина.....	30
2.1 Поняття магнетизму.....	30
2.2 Взаємодія постійних магнітів.....	42
2.3 Явище левітації та магнітні підвіси.....	46
2.3.1 Підвіси постійних магнітів.....	49
2.3.2 Матеріали для постійних магнітів.....	61
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ II.....	63
РОЗДІЛ III. Дослідження взаємодії високо коерцитивних магнітів.....	64
3.1 Дослідження взаємодії та моделювання двох магнітів.....	64
3.2 Дослідження та моделювання магнітного підвісів.....	73
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ III.....	75
ВИСНОВКИ.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
ДОДАТОК А.....	83
ДОДАТОК Б.....	85

ВСТУП

Актуальність даної теми, полягає у тому, що комп'ютерне моделювання стало одним з найважливіших методів наукового дослідження у різних галузях науки. Будь то фізика, механіка, біологія, хімія, астрофізика, біологія, економіка. Комп'ютерне моделювання використовується для отримання нових знань про об'єкт чи для наближеної оцінки поведінки систем, занадто складних для аналітичного дослідження.

Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем. Комп'ютерні моделі простіше і зручніше досліджувати в силу їх можливості проводити обчислювальні експерименти, в тих випадках коли реальні експерименти ускладненні через фінансові або фізичні перешкоди, або можуть дати непередбачуваний результат.

Логічність і формалізованість комп'ютерних моделей дозволяє виділити основні фактори, що визначають властивості досліджуваного об'єкту-оригіналу (або цілого класу об'єктів), зокрема, досліджувати відгук модельованої фізичної системи на зміни її параметрів і початкових умов. Фізичні властивості магнітних систем, добре вивчені до сьогоднішнього часу, але можливості використання цих особливостей, є відкритими і до теперішнього часу.

Одним з можливих використань відштовхувальної можливості магнітів, є створення різних магнітних підшипників та магнітних підвісів.

Складність та іноді, велика вартість магнітів великих розмірів, потребує переходу від практичного вивчення та експериментів до комп'ютерного аналітичного вивчення нових систем.

Особлива увага приділена моделюванню магнітних полів. В роботі проведено розрахунок і графічне відображення конфігурації магнітного поля з використанням сучасного програмного забезпечення.

Також результатом роботи має бути можливість створення лабораторної роботи, для вивчення магнітних властивостей, студентами, а також створення патентної заявки, що забезпечує створення (модернізація) магнітного підвісу.

РОЗДІЛ 1.ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Моделювання як метод наукового дослідження

Моделювання в широкому сенсі — це особливий пізнавальний процес, метод теоретичного та практичного опосередкованого пізнання, коли суб'єкт замість безпосереднього об'єкта пізнання вибирає чи створює схожий із ним допоміжний об'єкт-замісник (модель), досліджує його, а здобуту інформацію переносить на реальний предмет вивчення.[1]

Моделювання — це процес створення та дослідження моделі, а модель-засіб, форма наукового пізнання.

Моделювання – складна, трудомістка і відповідальна наукова задача. Іноді дослідження за допомогою моделей є єдино можливим способом експериментального вивчення технологічних процесів. Так, процеси, які тривають багато років, можна вивчати на моделях протягом короткого проміжку часу. І навпаки, швидкоплинні процеси вивчаються на моделях протягом більш довгого часу.[2]

Моделювання різних фізичних процесів виходить з подібності явищ, що розглядаються. Два явища називаються подібними, якщо за характеристиками одного можна одержати характеристики іншого шляхом простого перерахунку. Умовами або критеріями подібності двох явищ є рівності деяких безрозмірних параметрів, які називаються числами або критеріями подібності. Визначення критеріїв подібності при моделюванні процесів, що вивчаються, потребує глибокого знання механізму цих процесів і є досить важкою задачею. До першої групи потрібно віднести процеси і явища, які можна описати рівняннями, до другої, яка становить найбільший інтерес, – процеси і явища, які ще не мають математичного опису. У випадках, коли рівняння досліджуваних процесів невідомі, числа подібності можна знайти за теорією розмірностей.

1.2 Види моделювання

Спочатку в якості моделі людство використало геометричні зображення, макети, схему або малюнки об'єкта вивчення. Прикладами можуть бути креслення проєктованого споруди або зразки у вигляді макетів літака або автомобіля і т.п.(Рис.1.1) Будівництво будинку людина починає з створення його малюнка або макета, а потім готує проєктні документи у вигляді креслень.

Подібну роботу повинен виконувати також дизайнер одягу, який готує зразки нових моделей і людина, яка демонструє ці моделі також називається моделлю. Одним словом, подібні моделі зазвичай називаються геометричними моделями об'єкта [3].

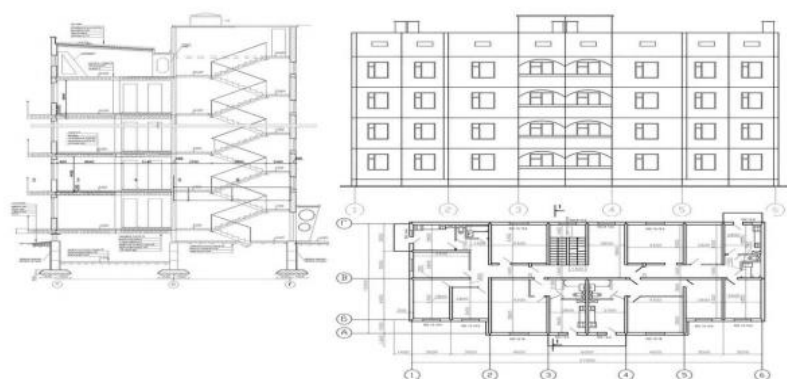


Рис. 1.1 Геометрична модель будинку

Крім геометричних моделей були використані так звані аналогові моделі. аналогові моделі використовують подобу, що існує між двома явищами або процесами. Одне з явищ є об'єктом моделювання, а друга його моделлю. Наприклад, вивчення складної мережі водопостачання міста може бути замінено вивченням електричної схеми, створеної на стенді лабораторії.[3]

Слід зауважити, що на основі аналогії були створені аналогові обчислювальні машини, які широко використовувалися в автоматизованих системах управління технологічними процесами(Рис.1.2).

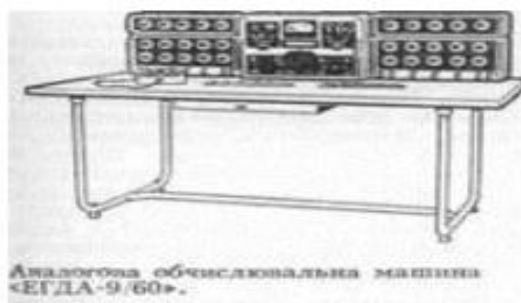


Рис. 1.2 Егда – 9/60

У наукових дослідженнях широко застосовуються математичні методи, які стали основою математичного моделювання об'єктів дослідження. Застосування обчислювальної техніки в дослідницькій і проектній роботі дозволило використовувати комп'ютерне моделювання. З такого невеликого перерахування видів моделей можна переконатися в тому, що моделі, якими користуються дослідники, дуже різноманітні. Моделі можуть бути умовно розділені на дві групи: пізнавальні і прагматичні [3].

Пізнавальні моделі є формою представлення знань, відображенням існуючих закономірностей в природі і в суспільстві. Прагматичні моделі є засобом організації практичних дій, наприклад, проекти, креслення, малюнки і т.п. Протягом багатьох століть природничі науки розвивалися і ґрунтувалися на результатах спостережень процесів, що відбуваються в навколишньому світі. Для цієї мети створювалися різні інструменти для проведення спостережень і вимірів або візуального вивчення (різні прилади, телескопи, мікроскопи та інші) за процесами, що відбуваються або природними явищами.

Через такого підходу багато розділів науки мали описовий характер, що ускладнювало проведення кількісного аналізу процесів, що відбуваються. З іншого боку, як було зазначено вище, існують важкодоступні об'єкти дослідження, для яких неможливо проводити інструментальні спостереження або візуальне вивчення. наприклад, дослідження енергетичних ядерних систем, космічні дослідження, вивчення турбулентних течій рідин, дослідження атмосферних явищ, дослідження тектонічних процесів, що відбуваються в надрах Землі і багато інших [1].

У зв'язку з цим, в процесі розвитку природничих наук виникла необхідність використання інших методів, що дозволяють проводити кількісний аналіз замість якісного аналізу. Таким методом став метод математичного моделювання. Цей метод дозволяє використовувати замість традиційних описових методів методи кількісного аналізу. Вони успішно використовуються для вивчення процесів і явищ, складних і важкодоступних для проведення вимірювань та інструментальних спостережень. В даний час моделювання є невід'ємною частиною людської діяльності. Особливо воно стало актуальним в наукових дослідженнях і цей метод став одним з головних методів вивчення складних явищ і процесів.[4]

В останні роки інтенсивно використовуються методи математичного моделювання, що дозволяють використовувати добре розвинений математичний апарат і швидкодіючу обчислювальну техніку. Використання математики і методів математичного моделювання в різних галузях знань призвело до появи нових напрямків у науці. Наприклад, математична фізика, математична економіка, математична лінгвістика і багато інших. Такі напрямки науки як біофізика, геофізика, геодинаміка, геотектоніка, космодинаміка і інші також з'явилися в результаті застосування методів математичного моделювання.

Математичне моделювання складних проблем призвело до необхідності вирішення дуже складних математичних задач. Тому виникали певні труднощі, пов'язані з вирішенням таких завдань, що вимагало застосування потужних обчислювальних засобів. поява електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) дозволило вирішувати цю проблему. Використання комп'ютерних та телекомунікаційних засобів зберігання, обробки, передачі та отримання інформації дозволило вирішувати складні завдання, які раніше не могли бути вирішені. Застосування комп'ютерних технологій для вирішення наукових проблем вимагало розвиток нових напрямків в математиці і створення нових математичних моделей процесів і явищ, а також методів вирішення різних

завдань. З іншого боку, поява нових математичних моделей і методів стимулювало розробку нових програмних продуктів для ЕОМ, а це, в свою чергу, стимулювало розвиток комп'ютерної техніки і технологій. З'явився новий термін « комп'ютерне моделювання ». [2]

Фізичне моделювання:

- Створення матеріальної моделі, що має таку саму фізичну природу (такий самий фізичний зміст), як і дійсне явище, що вивчається на основі критеріїв геометричного, кінематичного й динамічного моделювання.
- Відтворення на моделі й дослідження процесів, що якісно однакові з процесами у реальному об'єкті. Під час дослідження процесу необхідно забезпечити геометричну, часову та фізичну подібності.

Фізичне моделювання - метод експериментального вивчення фізичних явищ, який базується на їх фізичній подібності.

Метод застосовується у випадках, коли:

- відсутня математична модель явища (машини, процесу тощо), або така модель дуже складна, вимагає багато вихідних даних, одержання яких ускладнене.
- відтворення явища (машини, процесу) в реальних масштабах недоцільне.

Метод полягає у створенні лабораторної фізичної моделі явища у зменшеному масштабі і проведення експериментів на цій моделі. Висновки і результати, одержані на моделі розповсюджуються на явище у реальних масштабах.

Метод може дати надійні результати тільки у випадку наявності фізичної подібності реального явища і моделі. Подібність досягається за рахунок рівності для моделі і реального явища значень критеріїв подібності — безрозмірних чисел, що залежать від фізичних (у тому числі геометричних) параметрів, що характеризують явище. Експериментальні дані одержані на

моделі розповсюджуються на реальний об'єкт з урахуванням критеріїв подібності (на практиці — з врахуванням певних коефіцієнтів).[5]

У широкому сенсі будь-який експеримент є фізичним моделюванням процесу в певних конкретних умовах.

Деякі приклади застосування методу фізичного моделювання:

- Дослідження течій газів і обтікання літальних апаратів, автомобілів, тощо в аеродинамічних трубах.
- Гідродинамічні дослідження на зменшених моделях кораблів, гідротехнічних споруд тощо
- Вивчення стійкості складних конструкцій, під впливом складних силових навантажень.
- Вимірювання теплових потоків і розсіювання тепла в пристроях і системах, що працюють в умовах великих теплових навантажень.
- Вивчення стихійних явищ та їх наслідків.

У наукових дослідженнях існують гіпотези, висловлені дослідниками на основі спостережень і досвіду. Одним з важливих напрямків в науці є перевірка цих гіпотез за допомогою лабораторних або натурних випробувань. гіпотеза також може розглядатися як модель досліджуваного об'єкта.

Після багаторазових випробувань та аналізу результатів можуть бути встановлені певні закономірності, що визначають властивості і характер об'єкта. У цьому головну роль відіграє математичне і комп'ютерне моделювання. [6]

Історично математична модель стала використовуватися як інструмент для вивчення природних явищ і процесів, в питаннях проектування і планування дуже давно, з моменту появи звичайних арифметичних обчислень. Однак використання математики в інших галузях знань отримало значного розвитку з розвитком науки і техніки, особливо з появою комп'ютерної техніки, застосуванням математичного та комп'ютерного моделювання.

1.3 Опис середовища Comsol Multiphysics

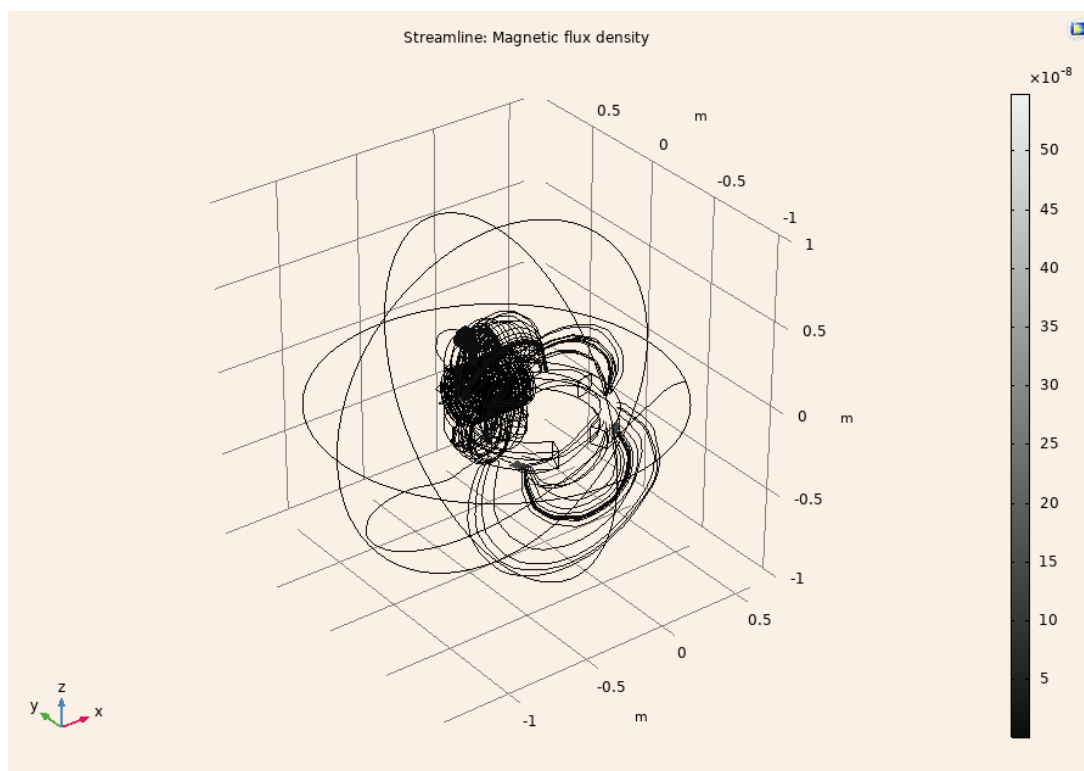


Рис. 1.3 Моделювання пів кільця та катушки у середовищі Comsol

За допомогою COMSOL Multiphysics є можливість легко моделювати абсолютну більшість фізичних процесів, які в свою чергу характеризуються диференціальними рівняннями. Програма COMSOL Multiphysics містить в собі цілий набір алгоритмів і систем, завдяки яким вона справляється зі складними завданнями, а простота в структурі додатка надає простоту в використанні і гнучкість.[7]

Також необхідно відзначити, що програма має зручну, високопродуктивну і універсальну середу для моделювання процесів фізики. Завдяки вбудованим шаблонам, яких можна піддавати налаштувань і змін, програма дозволяє «зімітувати» практично будь-яку комбінацію фізичних середовищ і полів. Програма є свого роду середовищем для докладного рішення науково-технічних проблем, які засновані на диференціальних рівняннях та інших математичних принципах.

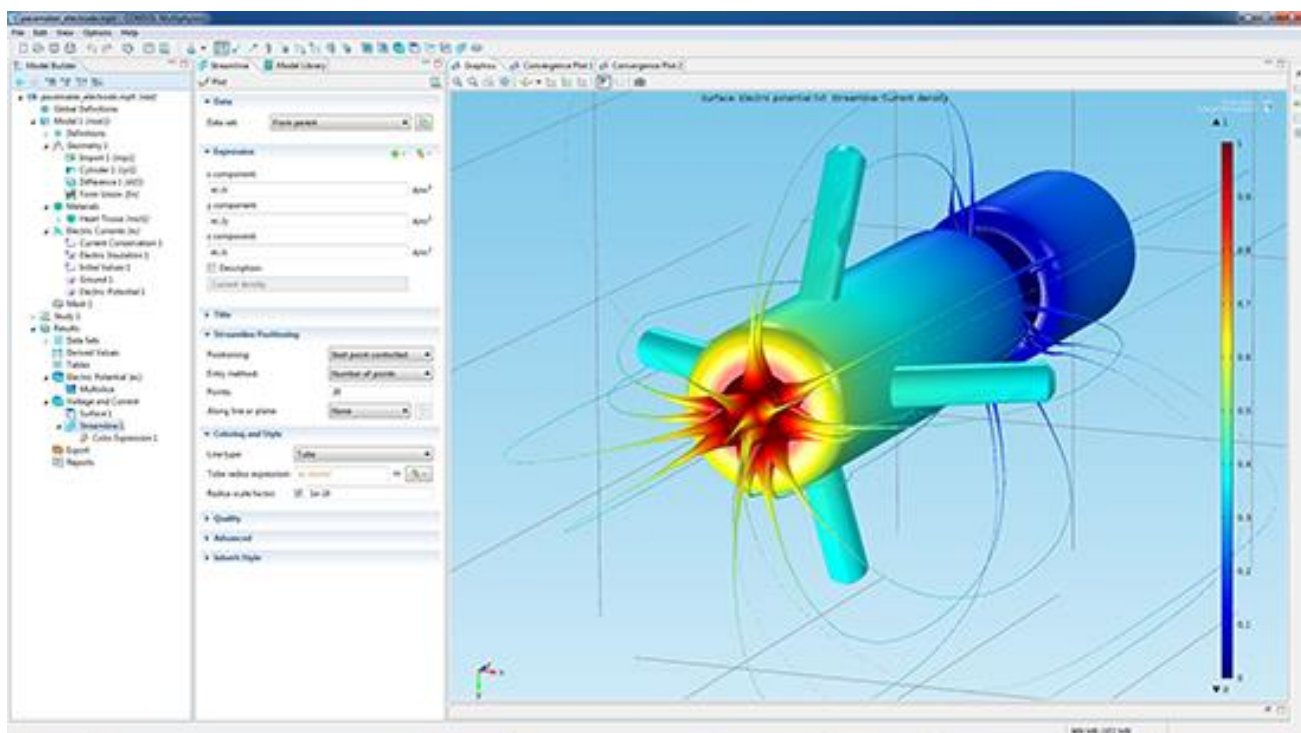


Рис. 1.4 Моделювання у середовищі Comsol

COMSOL - потужна інтерактивне середовище для моделювання і вирішення наукових і технічних проблем, заснованих на диференціальних рівняннях в частинних похідних (PDE). Серед програм дозволяє легко розвивати і розширювати модель, яка знаходиться в складі пакету, а також присутня можливість переходу в інші фізичні поля, змінюючи при цьому стан моделі, які відносять до різних галузей науки і техніки. Продуктивний і функціональний інтерфейс програми не вимагає від користувача глибоких знань у сфері математики і чисельного аналізу. Внаслідок цього, є можливість формувати продуктивні моделі, задаючи лише беруть участь фізичні величини, не особливо звертаючи увагу на рівняння які їх описують. COMSOL дає можливість створювати на чотирьох основних рівняннях, далі вони наводяться як «рівняння-основи».[7]

Незважаючи на різні підходи в освіті фізичних моделей, ПО виділяє кілька способів використання: через GUI-додаток COMSOL, або за допомогою командного рядка MATLAB. Основна математична одиниця, з

якої працює програма - цей система диференціальних рівнянь. В подальшому, в програмі

можна подавати системи декількома способами: в коефіцієнтній формі (в основному для лінійних задач і рішень), в головній (звичайної) формі (для нелінійних моделей), в проекційній формі (призначена в основному для моделей з просторовими і тимчасовими змінними). Пакет програми здатний підтримувати завдання на індивідуальні значення і частоти в головній (звичайної) формі (для нелінійних моделей), в проекційній формі (призначена в основному для моделей з просторовими і тимчасовими змінними). Пакет програми здатний підтримувати завдання на індивідуальні значення і частоти в головній (звичайної) формі (для нелінійних моделей), в проекційній формі (призначена в основному для моделей з просторовими і тимчасовими змінними). Також присутня можливість створення стаціонарних (не залежних від часу) і нестаціонарних, лінійних і нелінійних моделей. Пакет програми здатний підтримувати завдання на індивідуальні значення і частоти змінних.

При створенні PDE, здатних описати модель, в програмі застосовуються final elemental methods (FEM). Програмне забезпечення активно використовує дані вищевказані методи, враховуючи дрібниці і контроль над помилками при роботі з призначеними змінними.[7]

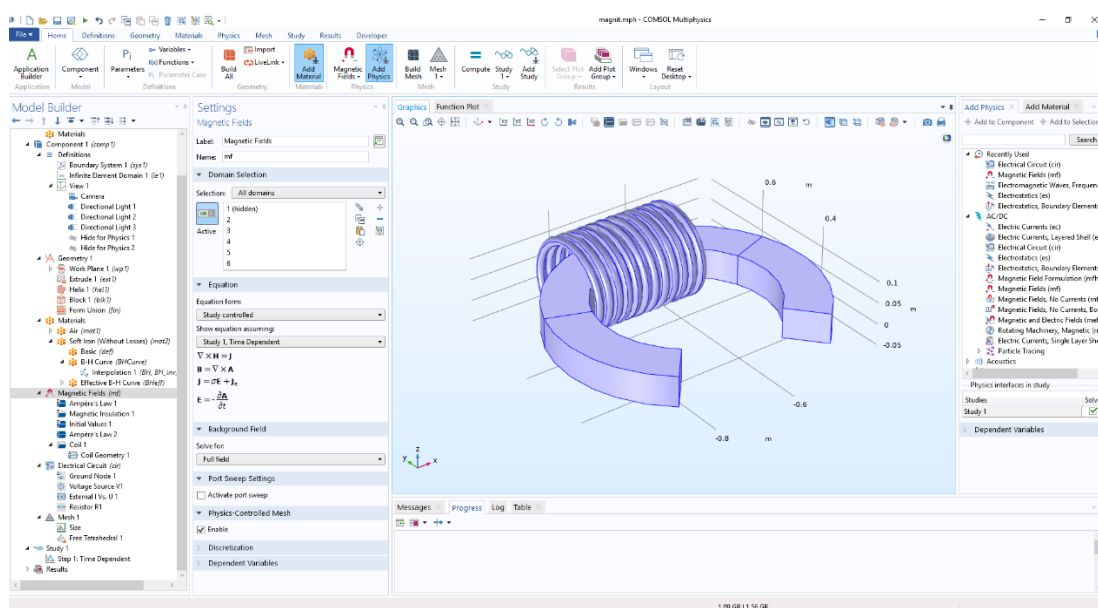


Рис. 1.5 Моделювання у середовищі Comsol

1.4 Опис середовища Femm

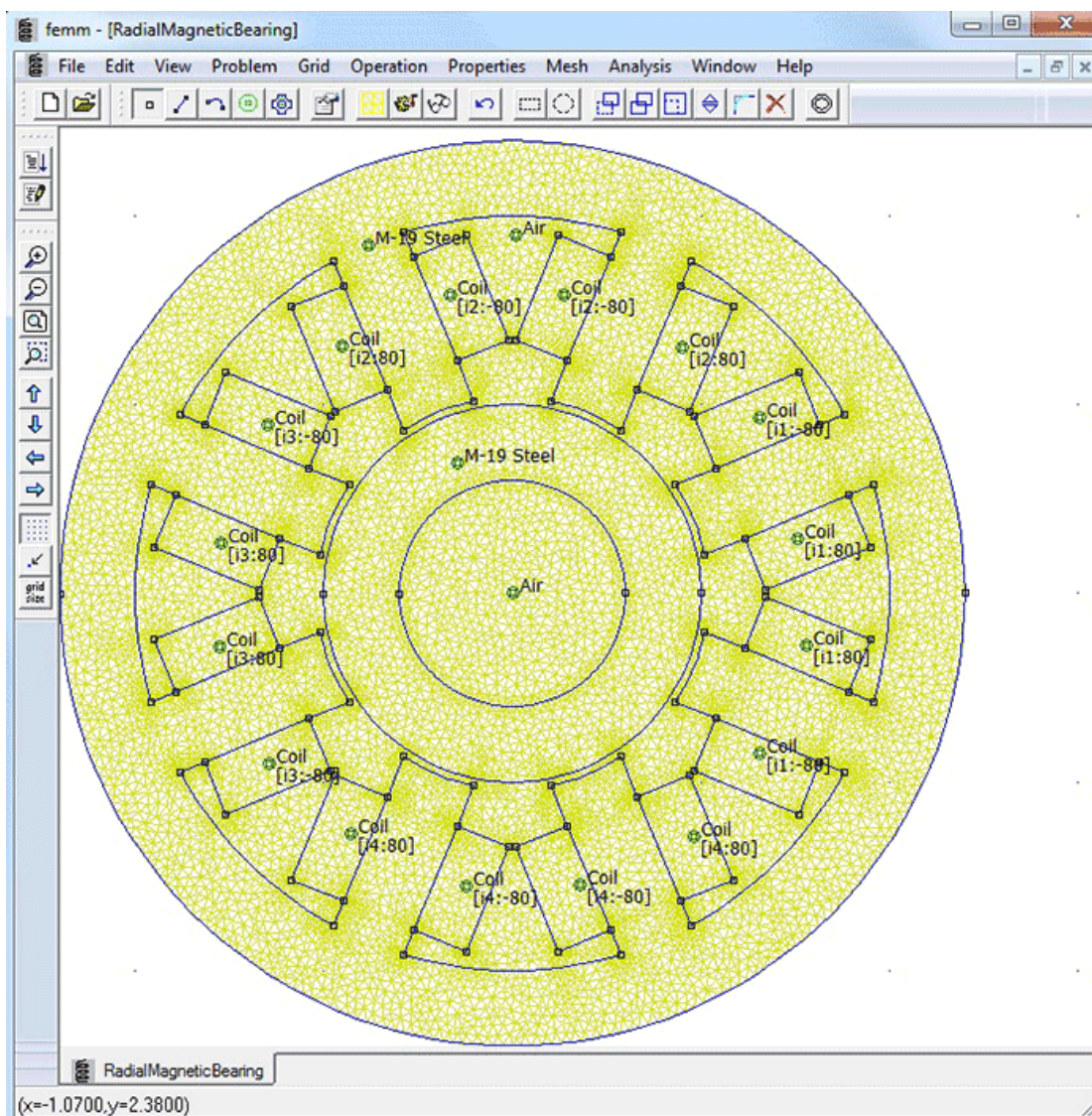


Рис. 1.6 Моделювання магнітного ротору у середовищі Femm

Програма Finite Element Method Magnetics (магнітні розрахунки способом кінцевих елементів, скорочено FEMM) дозволяє проводити на персональних комп'ютерах розрахунок плоскомеридіанних (осесиметричних) і плоскопаралельних стаціонарних / квазістаціонарних магнітних, а також стаціонарних електростатичних полів. Пакет дозволяє визначати їх ланцюгові і польові параметри і будувати картини. Перевагами даного ПЗ також є легкість освоєння.[4]

Основна частина програми складається з трьох модулів: графічного препроцесора, решателя і графічного постпроцесора. Робота з пакетом при розробці нової моделі починається з запуску препроцесора. Перший етап - геометричні побудови досліджуваних об'єктів в полярних або декартових координатах. Геометрія об'єкта також може бути імпортована з сторонніх графічних пакетів, таких як CorelDraw або AutoCAD. Другий етап - завдання для частин / блоків об'єкта властивостей матеріалів (в тому числі кривих намагнічування) і введення граничних умов (Діріхле, Неймана, змішаних, для кордонів з скін-ефектом, періодичності та антиперіодичності, спеціальних).

Після цього починається автоматична робота решателя, обраховується параметри моделі і будує сітку кінцевих елементів. Після закінчення розрахунків запускається постпроцесор, при цьому створюються зонні картини полів: для стаціонарного магнітного поля - ліній магнітного потоку, для квазістаціонарного - ліній дійсного значення векторного магнітного потенціалу.

Параметри полів можна переглянути в будь-якій точці області, а в певних зонах оцінити ряд інтегральних величин: магнітних потоків, індуктивностей, магнітних напруг і т.д.[4]

Серед інших особливостей програми варто відзначити наявність функції скасування / повернення дій, можливість вибору одиниць вимірювання (дюймів або міліметрів), побудова графіків зміни ряду величин (модуля магнітної індукції, модуля векторного потенціалу, модуля напруженості магнітного поля і т.д.). Крім інтерактивних розрахунків, в програмі FEMM є пакетний режим роботи. Для написання програм, що працюють в пакетному режимі, застосовується алгоритмічна мова Lua. Позитивна сторона пакетного режиму полягає в можливості формувати, аналізувати і коректувати геометрію області розрахунку, а також організовувати оцінку і видачу результатів, вводячи необхідні математичні

вирази і рівняння. Всі результати робіт можна зберігати, причому підтримуються російськомовні символи в імені файлу і папок шляху.

Останні версії програми FEMM включають в себе набори інструментів для взаємодії з додатками Octave / Matlab, Scilab і Mathematica. [4]

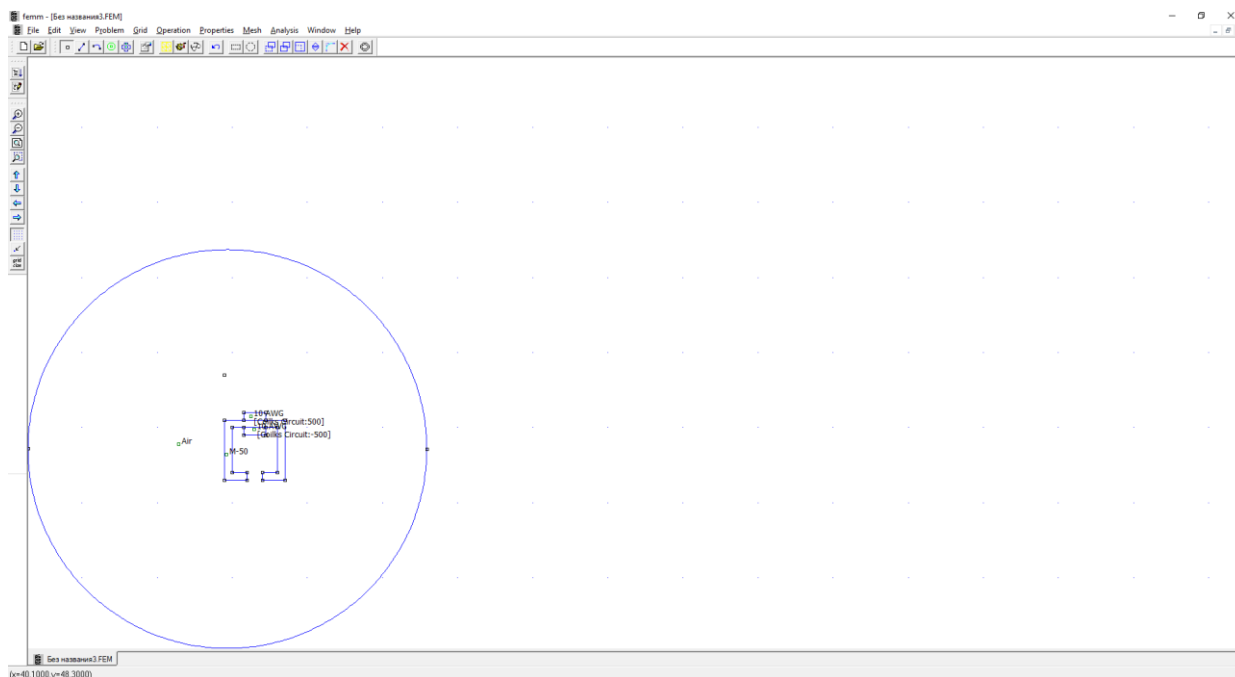


Рис. 1.7 Створення моделі електромагніту у програмі Femm

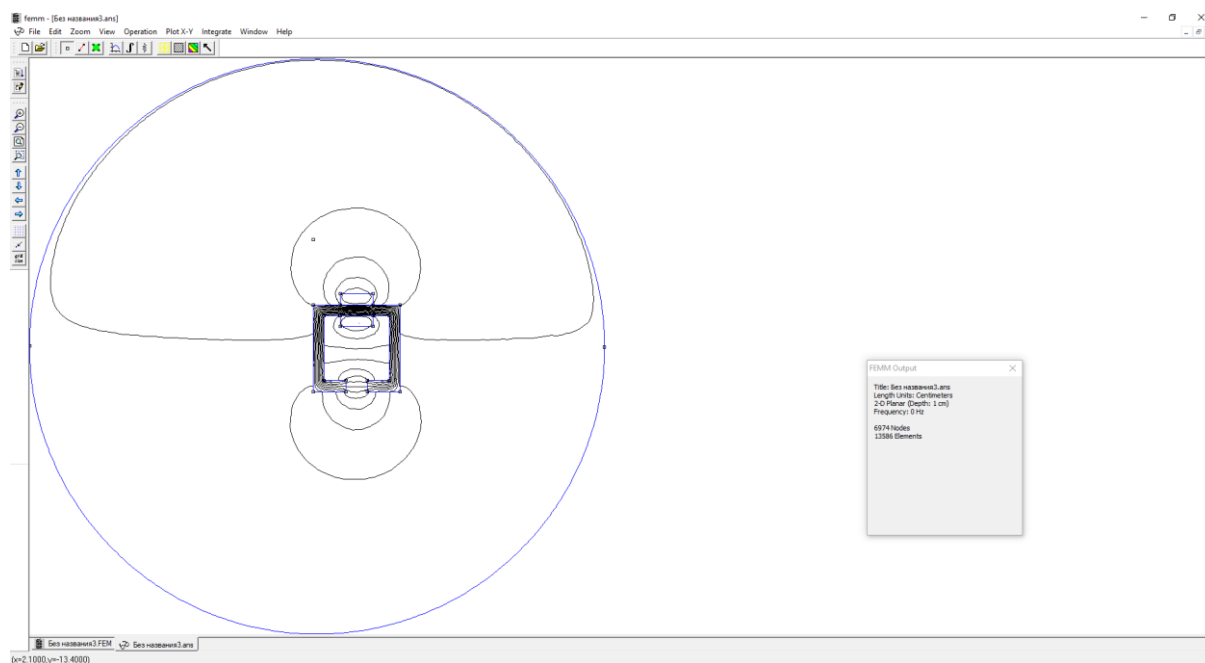


Рис. 1.8 Задання фізичних особливостей електромагніту у програмі Femm

Творцем програми з розрахунку магнітних полів є David Meeker (США, штат Массачусетс, місто Уолт), що працює старшим науковим

співробітником в компанії QinetiQ North America, що займається розробкою супутникових розвідувальних систем і військових роботів. Вже згадана програма з'явилася більше десяти років тому і носила назву BELA, дозволяючи проводити розрахунок тільки електростатичних полів. З тих пір автор регулярно випускає нові версії програмного пакету.

Програма FEMM поширюється в рамках ліцензії Aladdin Free Public, що не допускає стягнення плати за поширення.

Дистрибутив програми містить в собі докладні призначені для користувача керівництва, а також зразки виконаних робіт. На сайті присутні старі версії програмного забезпечення, покрокові приклади по роботі з пакетом, повний комплект документації та список поширених запитань. [4]

1.5 Опис середовища Elcut

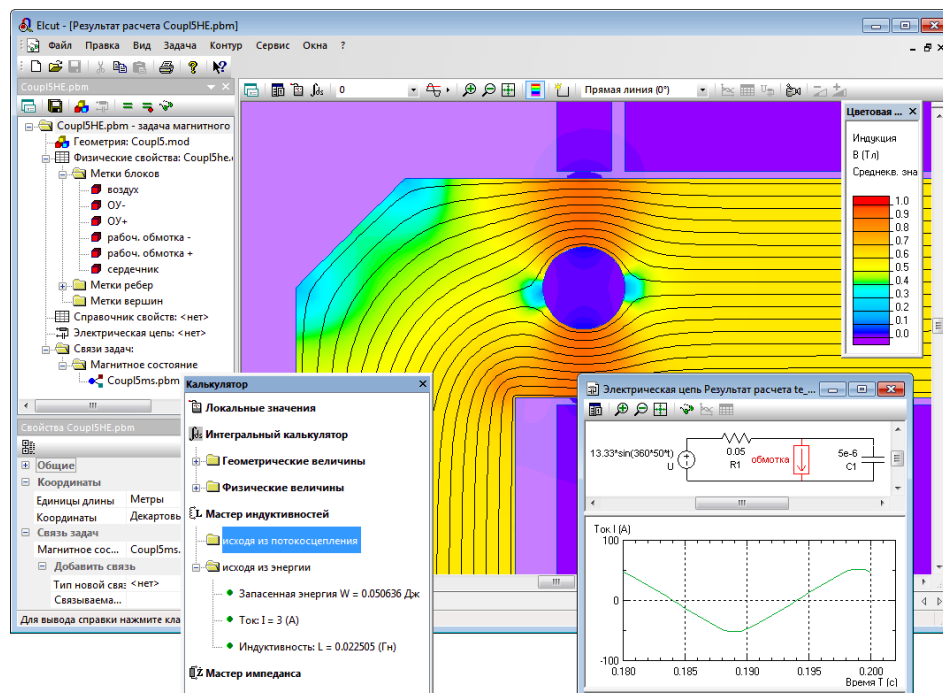


Рис. 1.9 Середовище Elcut

ELCUT - це інтегрована діалогова система програм, що дозволяє вирішувати плоскі і осесиметричні завдання наступних типів:

- Розрахунок електричного поля:
- Електричне поле.
- Електричне поле постійних струмів.
- Електричне поле змінних струмів.
- Нестационарне електричне поле.
- Розрахунок магнітного поля:
- магнитостатическ поле.
- Магнітне поле змінних струмів (з урахуванням вихрових струмів).
- Магнітне нестационарне поле (з урахуванням вихрових струмів і нелінійних матеріалів).
- Завдання теплопередачі (розрахунок температурного поля):
- Стаціонарна теплопередача
- Нестационарная теплопередача (теплові перехідні процеси).

- Завдання механічної міцності:
- Лінійний аналіз напружено-деформованого стану.
- Мультидисциплінарні (пов'язані) завдання.

За допомогою ELCUT ви зможете протягом 15-хвилинного сеансу:

- описати задачу - геометрію, властивості середовищ, джерела поля, граничні умови;
- вирішити задачу з високою точністю; [5]

Навчальні застосування програми ELCUT включають використання у вищих навчальних закладах і школах. Для таких цілей розроблені і використовуються спеціальні типи ліцензій, що дозволяють зацікавленим навчальним закладам знайти варіант, найбільш повно відповідає їх вимогам і одночасно відповідний їх технічним і матеріальним можливостям. Розуміючи проблеми вищої і середньої школи, ми йдемо назустріч викладачам, реалізуючи проекти ELCUT для підтримки ВНЗ Росії та ELCUT для шкіл.

ELCUT використовується як ефективний засіб при підготовці інженерів. Більшість зареєстрованих користувачів безкоштовного пакету ELCUT Студентський вчать або викладають в університетах, а багато навчальних закладів придбали і ELCUT Професійний. Особливо популярний ELCUT на спеціальностях і курсах теоретичних основ електротехніки (ТОЕ), електричних машин, ізоляції, електротехнологій, електроприводу, енергозабезпечення підприємств, електромеханіки, електротехнічних матеріалів, автоматизації, систем автоматизованого проектування (САПР) та інших. [5]

1.6 Опис середовища Ansys Maxwell

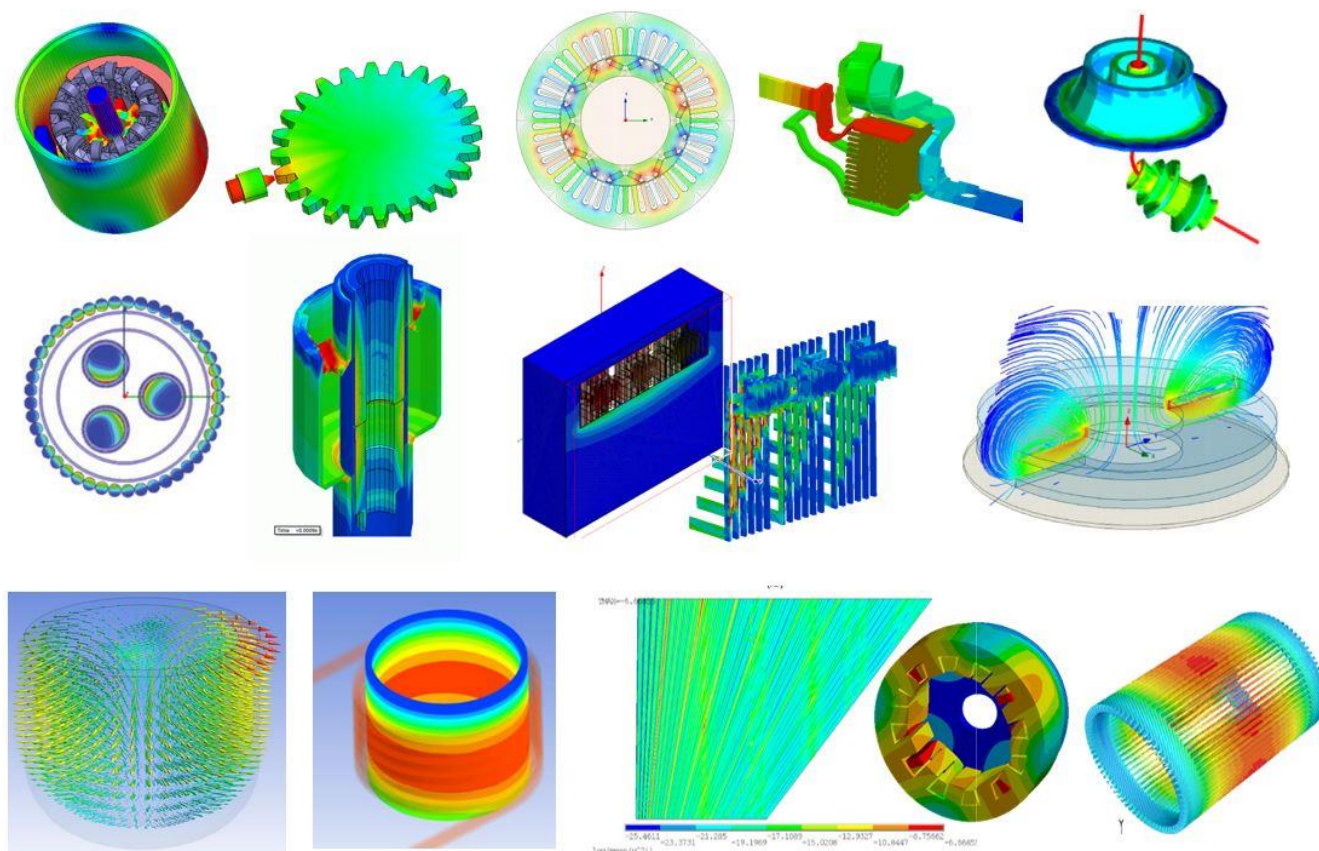


Рис. 1.10 Можливості Ansys Maxwell

ANSYS Maxwell - це сучасне, високопродуктивне програмне забезпечення для моделювання двовимірних і тривимірних електромагнітних полів, що використовується для аналізу моделей двигунів, датчиків, трансформаторів і багатьох інших електричних і електромеханічних пристроїв різного застосування. [6]

Математична основа ANSYS Maxwell - метод кінцевих елементів, завдання якого полягає в знаходженні єдиного можливого розподілу електромагнітного поля в заданій розрахунковій області при зазначених граничних умовах і порушеннях.

ANSYS Maxwell стрімко розвивається, високопродуктивні вирішувачі з високою точністю і максимальною швидкістю розраховують статичні, гармонійні електромагнітні та електричні поля, а також перехідні процеси в польових завданнях. Користувачеві надається величезний інструментарій та

сучасний постпроцесор для розрахунку і оптимізації електромеханічних пристроїв заснованому на аналізі віртуальної моделі.

ANSYS Maxwell застосовується для розробки різних електромеханічних вузлів в електромашинобудуванні, автомобільної, оборонної, авіакосмічній галузі. Робота з віртуальними моделями, замість дорогих натурних експериментів має чітку економічну обґрунтованість. Електромеханіка: двигуни і генератори, поступальні й обертові електромагніти, реле, мікро електромеханічні пристрої МЕМС. Електромагнетизм: котушки індуктивності, постійні магніти, датчики, кабелі. Силова електроніка: трансформаторна техніка, перетворювачі, токонесущей ошиновка, IGBT транзистори і багато інших пристроїв. Поведінка електромагнітних полів: вивчення екранування, електростатичні завдання, електромагнітна сумісність, напівпровідники, бездротова передача енергії. Міждисциплінарні завдання: магнітне перемішування, індукційний нагрів, аналіз вібрації і акустики в електричних машинах.[6]

ANSYS Maxwell оснащений вбудованим графічним редактором, функціонал якого в повній мірі забезпечує потреби користувача на етапі підготовки моделі для розрахунку. Імпорт геометричній CAD-моделі з усіх сучасних пакетів тривимірного моделювання. Більш докладно про імпорті геометричних моделей можна дізнатися в описі ліцензії ANSYS Alinks for MCAD Робота з великими збірками. База примітивів: прямокутник, окружність, паралелепіпед, циліндр, конус, сфера, тор. Можливість створення геометричних моделей зверху-вниз (операції з геометричними примітивами) і знизу-вгору (точки, лінії, поверхні, об'єми). Операції над геометричними об'єктами (додавання, віднімання, перетин і т.д.). Можливість злиття декількох геометричних об'єктів в один. Параметричне завдання геометрії. Перевірка наявності малих геометричних об'єктів, сингулярностей і багато чого іншого з можливістю візуального контролю. Інструменти вимірювання геометричних об'єктів: запит обсягу, площі поверхні, довжини лінії і ін.

Даних ANSYS Maxwell має набір примітивів, який використовується для спрощення створення і параметризації моделей електричних машин і трансформаторів: елементи статоров, роторів, магнітопроводов, елементи обмоток, корпуси електричних машин.[6]

ANSYS Maxwell підтримує такі типи завдань в лінійних і нелінійних середовищах, плоскопаралельних, осесиметричних, тривимірних постановках: магнітостатики. Магнітні поля, викликані поширенням щільності постійного струму в провідниках, постійними магнітами, а також завдання з зовнішніми постійними магнітними полями. Розподіл магнітної індукції в магнітній системі електромагніту. Гармонійні поля. Сталі електромагнітні поля з індукованими вихровими струмами в провідних частинах моделі, викликані поширенням змінних струмів в провідниках (однакової частоти, різних за фазами).

Джерелом магнітного поля може бути зовнішнє змінне електромагнітне поле. Рішення гармонійної магнітної завдання - це повне хвильове рішення, що включає ефекти електромагнітного хвильового випромінювання. Цей тип рішення застосовується для вирішення електромагнітних завдань, де значний внесок в роботу моделі вносять поверхневий ефект індукованих струмів і ефект близькості. Індуковані вихрові струми в феромагнітному провідному матеріалі.

Нестационарне магнітне поле. Розглядається перехідний процес в електромеханічних системах, викликаний постійними магнітами і струмопровідними обмотками, живити джерелами напруги або струму з довільним зміною в часі. Обмотки можуть бути підключені до електричних ланцюгів управління ANSYS Maxwell Circuit Editor або ANSYS Simplorer. У цьому типі рішення можливо розглядати ефекти обертального або поступального руху елементів моделі в магнітному полі з урахуванням наведених вихрових струмів. Моделювання магнітного поля двигуна в ANSYS Maxwell. Електричні поля. Можуть ставитися до однієї з трьох

категорій: Електростатичні поля в діелектриках, викликані напругою і зарядами.

Електричні поля в провідниках, що описуються просторовим поширенням напруги, електричного поля і щільності постійного струму. Комбінація попередніх двох варіантів з рішеннями по полю в провідниках, як початкові умови для електростатичного завдання. Розподіл електричного потенціалу ЛЕП.[6]

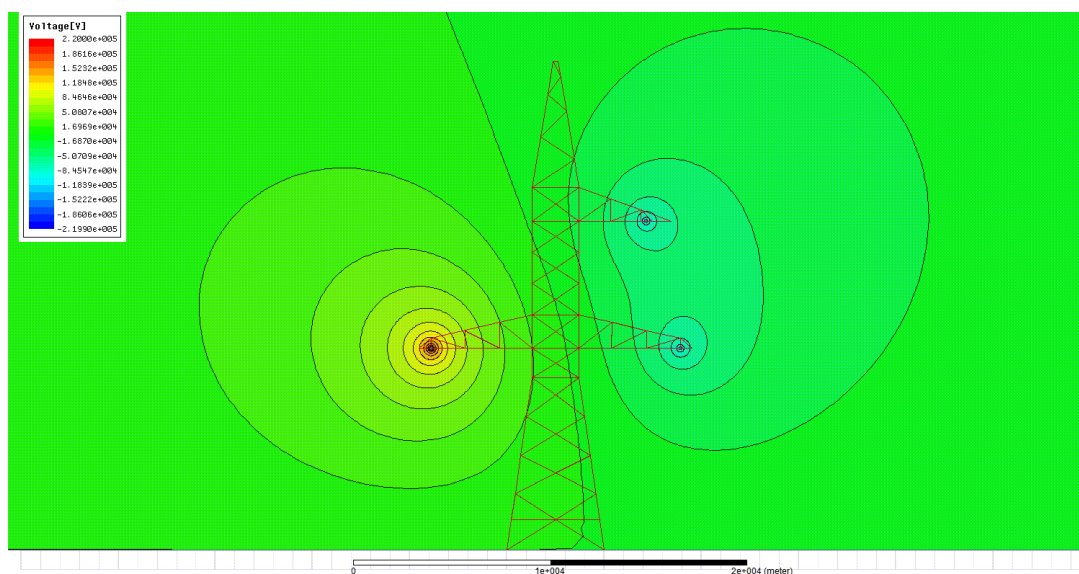


Рис. 1.11 Рішення електростатичного завдання в ANSYS Maxwell

1.7 Порівняння програм для моделювання

Всі перелічені середовища, для комп'ютерного моделювання фізичних процесів – є потужними способами для економії часу на розрахунки та візуального відображення фізичної моделі.

У кожній з них є свої плюси та мінуси. Основими відмінностями цих програм є те, що вони моделюють у 2D (femm, elcut) та у 3D (Maxwell, Comsol).

Якщо фізична задача допускає моделювання у форматі 2D, або ж можливо використовувати метод зрізу і тим самим перейти до задачі у 2d, то більш легко та раціонально використовувати програми femm та elcut. Але, програма elcut має обмеження розбиття моделі, а саме до 255 точок. В той час, коли femm все чудово рахує.

Висновки до розділу I

Вибір програм (середовищ) для моделювання фізичних процесів, є достатньо великим. У кожному випадку, ми отримаємо більш менш точні результати. Програми поділяються на дві групи: для 2D та 3D моделювання. У кожній є плюси та мінуси, які ми розберемо далі.

Але використання таких середовищ для моделювання, є дуже раціональною, адже дозволяє зберегти час для отримання теоретичних результатів та збереження грошових витрат під час конструювання фізичних моделей. Так, результати вимірювань у таких програмах, є декілька не точними, адже вимірюють ідеальні умови. Але використання похибок, зводить комп'ютерні результати більш точними до реальних умов.

РОЗДІЛ II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Поняття магнетизму

Найпростіші прояви магнетизму відомі дуже давно і знайомі більшості з нас. Однак пояснити ці, здавалося б, прості явища на основі фундаментальних принципів фізики вдалося лише порівняно недавно.[8]

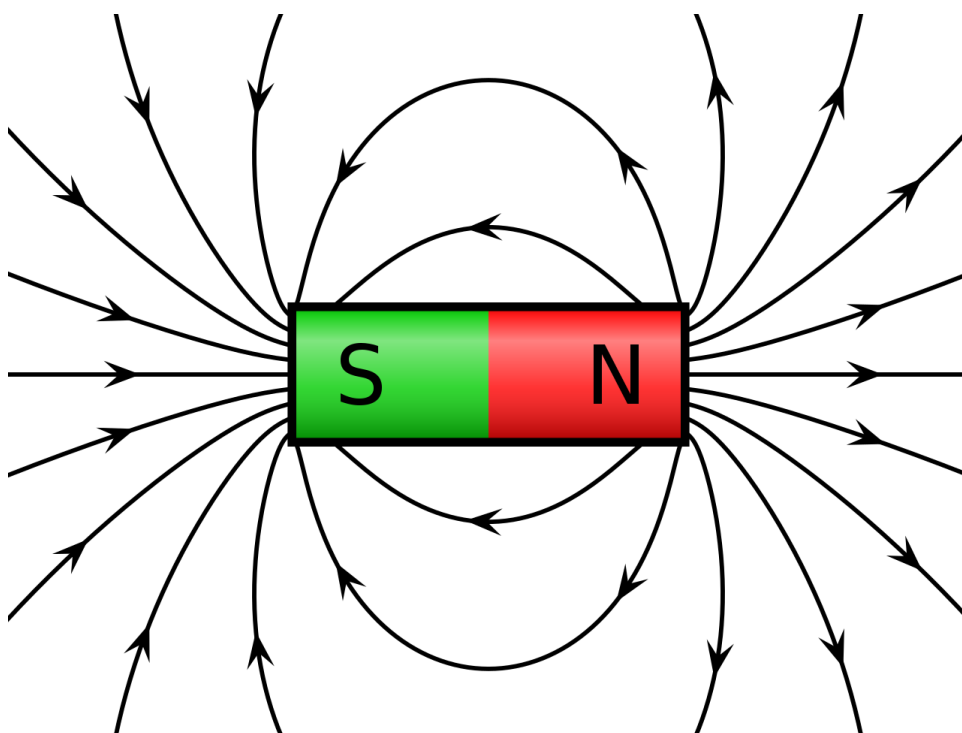


Рис. 2.1 Силові лінії постійного магніту

Існують магніти двох різних видів. Одні - так звані постійні магніти, виготовлені з «магнітно-твердих» матеріалів. Їх магнітні властивості не пов'язані з використанням зовнішніх джерел або струмів.

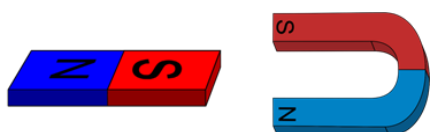


Рис. 2.2 Види постійних магнітів



Рис. 2.3 Електромагніт

До іншого виду відносяться так звані електромагніти з сердечником з «магнітно-м'якого» заліза. Створювані ними магнітні поля обумовлені в основному тим, що по дроту обмотки, що охоплює сердечник, проходить електричний струм.

Магнітні властивості стрижневого магніту найбільш помітні поблизу його кінців. Якщо такий магніт підвісити за середню частину так, щоб він міг вільно повертатися в горизонтальній площині, то він займе положення, приблизно відповідне напрямку з півночі на південь. Кінець стержня, який вказує на північ, називають північним полюсом, а протилежний кінець - південним полюсом. Різнойменні полюса двох магнітів притягуються один до одного, а однойменні взаємно відштовхуються.[9]

Якщо до одного з полюсів магніту наблизити брусок ненамагніченого заліза, то останній тимчасово намагнітиться. При цьому ближній до полюса магніту полюс намагніченого бруска буде протилежним по найменуванню, а дальній - однойменною. Тяжінням між полюсом магніту і індукованим ним в бруську протилежним полюсом і пояснюється дію магніту. Деякі матеріали (наприклад, сталь) самі стають слабкими постійними магнітами після того, як побувають близько постійного магніту або електромагніту. Сталевий стрижень можна намагнітити, просто провівши по його торця кінцем стрижневого постійного магніту. Отже, магніт притягує інші магніти і предмети з магнітних матеріалів, не перебуваючи в зіткненні з ними. Така дія на відстані пояснюється існуванням в просторі навколо магніту магнітного поля. Певне уявлення про інтенсивність і напрямку цього магнітного поля можна отримати, насипавши на лист картону або скла, покладений на магніт, залізні ошурки. Тирса вишикуються ланцюжками в напрямку поля, а густина ліній з тирси буде відповідати інтенсивності цього поля. (Гущі всього вони у кінців магніту, де інтенсивність магнітного поля найбільша.)

Магнітною індукцією визначається сила, з якою магнітне поле діє на провідник зі струмом що знаходиться в ньому. Якщо провідник, по якому

проходить струм I , розташований перпендикулярно лініям індукції, то за законом Ампера сила F , що діє на провідник, перпендикулярна і полю, і провіднику і пропорційна магнітної індукції, силі струму і довжині провідника. Таким чином, для магнітної індукції B можна написати вираз

$$B = \frac{F_{\max}}{I \cdot l} \quad (2.1)$$

де F - сила в ньютонах, I - струм в амперах, l - довжина в метрах. Одиницею виміру магнітної індукції є тесла (Тл). [7]

Далі слід ввести ще одну величину, що характеризує магнітне дію електричного струму. Припустимо, що струм проходить по дроту довжиною котушки, всередині якої розташований намагнічуватися матеріал. Силою, що намагнічує називається добуток електричного струму в котушці на число її витків (ця сила вимірюється в амперах, так як число витків - величина безрозмірна). [9]

Напруженість магнітного поля H дорівнює силі, що намагнічує, що припадає на одиницю довжини котушки. Таким чином, величина H вимірюється в амперах на метр; нею визначається намагніченість, що приймає матеріал всередині котушки.

У вакуумі магнітна індукція B пропорційна напруженості магнітного поля H :

$$B = \mu_0 H \quad (2.2)$$

де μ_0 - т. зв. магнітна постійна, що має універсальне значення $1,25663706212 \cdot 10^{-6}$ Гн / м. У багатьох матеріалах величина B приблизно пропорційна

H . Однак в феромагнітних матеріалах співвідношення між B і H дещо складніше (про що буде сказано нижче).

На рис. 2.4 зображений простий електромагніт, призначений для захоплення вантажів. Джерелом енергії служить акумуляторна батарея постійного струму. На малюнку показані також силові лінії поля електромагніту, які можна виявити звичайним методом ошурки. [10]

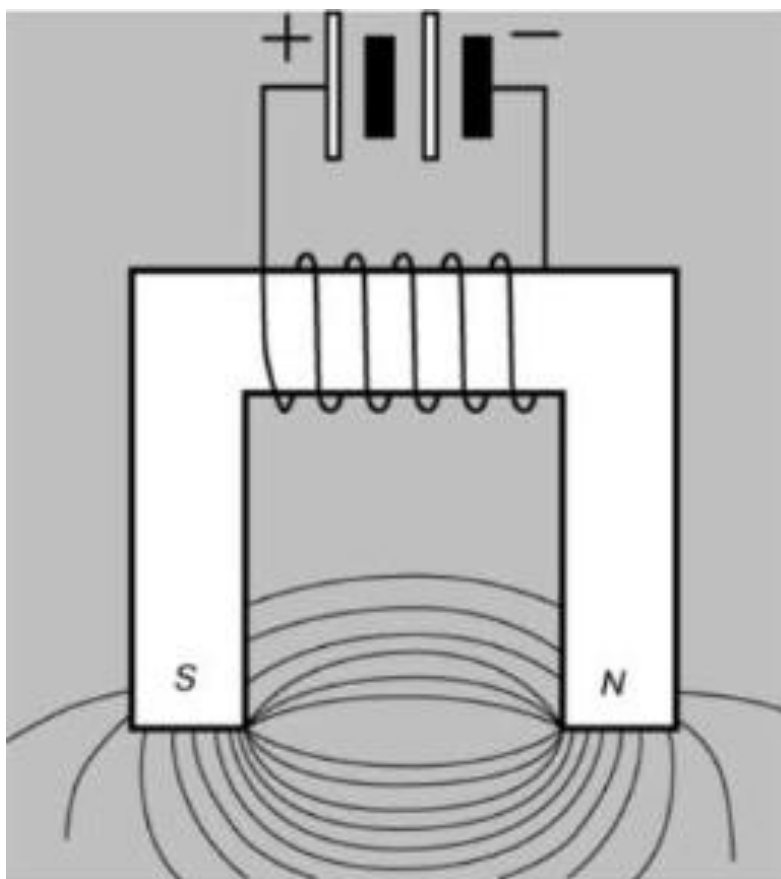


Рис. 2.4 Ілюстрація магніту, з соленоїдом

Магнітна проникність μ - це величина, що характеризує магнітні властивості матеріалу.

Феромагнітні метали Fe, Ni, Co і їх сплави мають дуже високі максимальні проникності - від 5000 (для Fe) до 800 000. У таких матеріалах при порівняно малих напруженостях поля H виникають великі індукції B , але зв'язок між цими величинами, взагалі кажучи, нелінійна через явище насичення і гістерезису, про які йдеться нижче. Феромагнітні матеріали сильно притягуються магнітами. Вони втрачають свої магнітні властивості при температурах вище точки Кюрі (770°C для Fe, 358°C для Ni, 1120°C для Co) і ведуть себе як парамагнетики, для яких індукція B аж до дуже високих значень напруженості H пропорційна їй - в точності так само, як це має місце в вакуумі. Багато елементів і з'єднань є парамагнітним при всіх температурах. Парамагнітні речовини характеризуються тим, що намагнічуються у зовнішньому магнітному полі; якщо ж це поле вимкнути,

парамагнетики повертаються в ненамагніченого стан. Намагніченість в феромагнетиках зберігається і після виключення зовнішнього поля.[10]

На рис. 2.5 представлена типова петля гістерезиса для магнітно-твердого (з великими втратами) феромагнітного матеріалу. Вона характеризує неоднозначну залежність намагніченості магніто впорядкованого матеріалу від напруженості поля, що намагнічує. Зі збільшенням напруженості магнітного поля від вихідної (нульової) точки (1) намагнічування йде по штрихованій лінії 1-2, причому величина m істотно змінюється в міру того, як зростає намагніченість зразка. У точці 2 досягається насичення, тобто при подальшому збільшенні напруженості намагніченість більше не збільшується. Якщо тепер поступово зменшувати величину H до нуля, то крива $B(H)$ вже не слідує колишнім шляхом, а проходить через точку 3, показуючи як би «пам'ять» матеріалу про «минулу історію», звідки і назва «гістерезис». Очевидно, що при цьому зберігається деяка залишкова намагніченість (відрізок 1-3). Після зміни напрямку поля, що намагнічує на зворотне, крива $B(H)$ проходить точку 4, причому відрізок (1) - (4) відповідає коерцитивній силі, яка перешкоджає розмагнічування. Подальше зростання значень $(-H)$ призводить криву гістерезису в третій квадрант - ділянку 4-5. Наступне за цим зменшення величини $(-H)$ до нуля і потім зростання позитивних значень H призведе до замикання петлі гістерезиса через точки 6, 7 і 2.

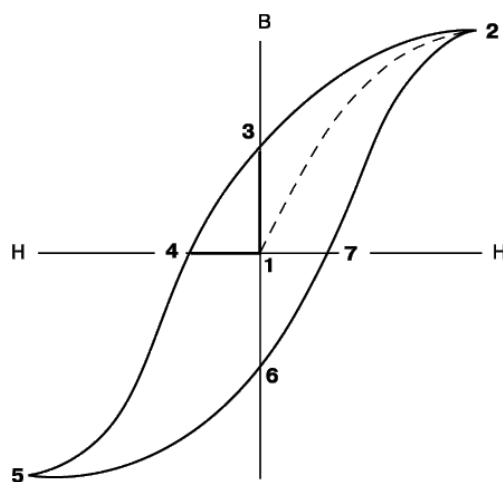


Рис. 2.5 Петля гістерезису

Вузька петля гістерезису (Рис. 2.6) характерна для магнітно-м'яких матеріалів - таких, як м'яка сталь і спеціальні сплави з великою магнітною проникністю. Такі сплави і були створені з метою зниження обумовлених гістерезисом енергетичних втрат. Більшість подібних спеціальних сплавів, як і ферити, володіють високим електричним опором, завдяки чому зменшуються не тільки магнітні втрати, а й електричні, обумовлені вихровими струмами. [11]

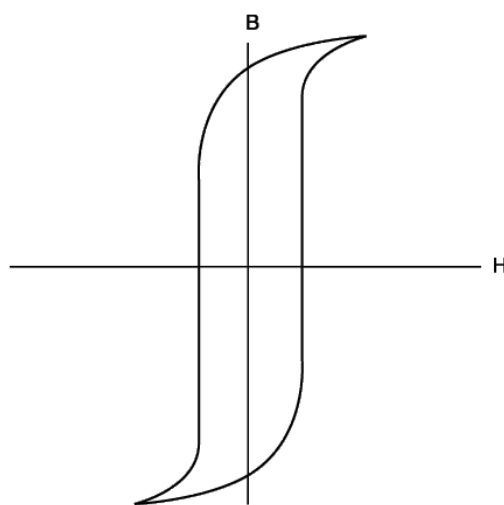


Рис. 2.6 Вузька петля гістерезису

Вперше думка про те, що магнітні явища в кінцевому рахунку зводяться до електричних, виникла у Ампера в 1825, коли він висловив ідею замкннутих внутрішніх мікрострумів, що циркулюють в кожному атомі магніту. Однак без будь-якого експериментального підтвердження наявності в речовині таких струмів (електрон був відкритий Дж. Томсон лише в 1897, а опис структури атома було дано Резерфордом і Бором в 1913) ця теорія «зів'яла». [12]

У 1852 В. Вебер висловив припущення, що кожен атом магнітної речовини являє собою крихітний магніт, або магнітний диполь, так що повна намагніченість речовини досягається, коли всі окремі атомні магніти виявляються збудованими в певному порядку (рис. 18, б). Вебер вважав, що зберігати своє впорядкування всупереч впливу, теплових коливань, цим елементарним магнітом, допомагає молекулярне або атомне «тертя». Його

теорія змогла пояснити намагнічування тіл при зіткненні з магнітом, а також їх розмагнічування при ударі або нагріванні; нарешті, пояснювалося і «розмноження» магнітів при розрізанні намагніченою голки або магнітного стержня на частини. І все ж ця теорія не пояснювала, ні походження самих елементарних магнітів, ні явищ насичення і гістерезису. Теорія Вебера була вдосконалена в 1890 Дж. Евінгом, який замінив його гіпотезу атомного тертя ідеєю міжатомних обмежуючих сил, які допомагають підтримувати впорядкування елементарних диполів, які становлять постійний магніт. [12]

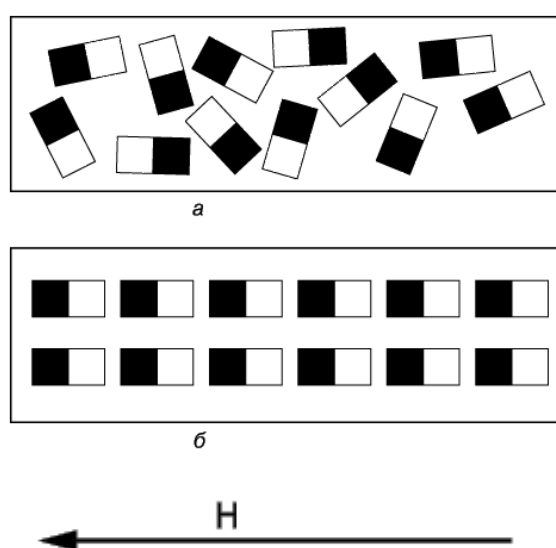


Рис. 2.7 Напрямок магнітних диполів

Підхід до проблеми, запропонований колись Ампером, отримав друге життя в 1905, коли П. Ланжевєн пояснив поведінку парамагнітних матеріалів, приписавши кожному атому внутрішній некомпенсований електричний струм. Згідно Ланжевєну, саме ці струми утворюють крихітні магніти, хаотично орієнтовані, коли зовнішнє поле відсутнє, але набувають впорядковану орієнтацію після його застосування. В цьому разі наближення до повної впорядкованості відповідає насиченню намагніченості. Крім того, Ланжевєн ввів поняття магнітного моменту, рівного для окремого атомного магніту, добутку «магнітного заряду» полюса на відстань між полюсами[13]

У 1907 П. Вейс ввів поняття «домєну», що стало важливим внеском у сучасну теорію магнетизму. Вейс представляв домєни в вигляді невеликих

«колоній» атомів, в межах яких магнітні моменти всіх атомів, в силу якихось причин, змушені зберігати однакову орієнтацію, так що кожен домен намагнічений до насичення. Окремий домен може мати лінійні розміри близько 0,01 мм і відповідно обсяг порядку 10^{-6} мм³. Домени розділені так званими блохівськими стінками, товщина яких не перевищує 1000 атомних розмірів. «Стінка» і два протилежно орієнтованих домену схематично зображено на рис. 2.8. Такі стінки являють собою «перехідні шари», в яких відбувається зміна напрямку намагніченості доменів. [13]

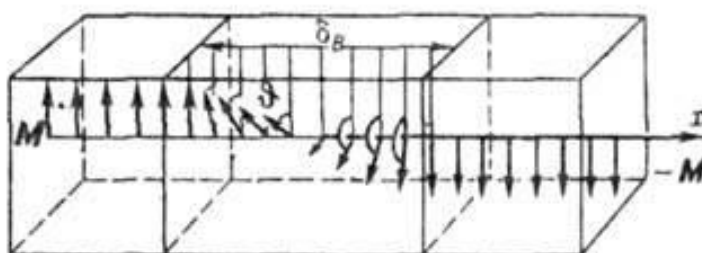


Рис. 2.8 Блохівська стінка

Крім парамагнітних і ферромагнітних матеріалів, існують матеріали з так званими антиферомагнітними і феррімагнітними властивостями. Різниця між цими видами магнетизму пояснюється на рис. 20. Виходячи з уявлення про домену, парамагнетизм можна розглядати як явище, обумовлене наявністю в матеріалі невеликих груп магнітних диполів, в яких окремі диполі дуже слабо взаємодіють один з одним (або взагалі не взаємодіють) і тому за відсутності зовнішнього поля приймають лише випадкові орієнтації (рис. 2.9, а). У ферромагнітних же матеріалах у межах кожного домена існує сильна взаємодія між окремими диполями, що приводить до їх впорядкованого паралельного вибудовування (рис. 2.9, б). У антиферомагнітних матеріалах, навпаки, взаємодія між окремими диполями призводить до їх антипаралельного впорядкованого вибудовування, так що повний магнітний момент кожного домена дорівнює нулю (рис. 2.9, в). Нарешті, в феррімагнітних матеріалах (наприклад, ферритах) є як паралельне, так і антипаралельне впорядкування (рис. 2.9, г), підсумком чого є слабкий магнетизм. [14]

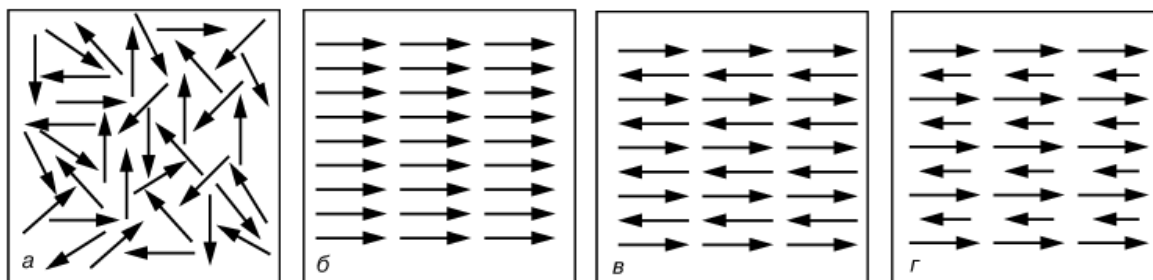


Рис. 2.9 Магніти з різними властивостями

Одне з перших великих і систематичних досліджень магнітних властивостей речовини було зроблено П. Кюрі. Він встановив, що по своїх магнітних властивостях всі речовини можна розділити на три класи. До першого належать речовини з різко вираженими магнітними властивостями, подібними властивостям заліза. Такі речовини називаються феромагнітними; їх магнітне поле помітно на значних відстанях. У другий клас потрапляють речовини, які називаються парамагнітними; магнітні властивості їх в загальному, аналогічні властивостям феромагнітних матеріалів, але набагато слабкіше. Наприклад, сила тяжіння до полюсів потужного електромагніту може вирвати з ваших рук залізний молоток, а щоб виявити тяжіння парамагнітного речовини до того ж магніту, потрібні, як правило, дуже чутливі аналітичні ваги.

До останнього, третього класу належать так звані діамагнітні речовини. Вони відштовхуються електромагнітом, тобто сила, що діє на Діамагнетик, спрямована протилежно тій, що діє на ферро- і парамагнетики. [13]

При вивченні магнітних властивостей найбільш важливе значення мають вимірювання двох типів. Перший з них -Вимірювання сили, що діє на зразок поблизу магніту; так визначається намагніченість зразка. До другого відносяться вимірювання «резонансних» частот, пов'язаних з намагнічених речовини. Атоми являють собою крихітні «гіроскопи» і в магнітному полі прецесують (як звичайний дзига під впливом кутового моменту, створюваного силою ваги) з частотою, яка може бути виміряна. Крім того, на вільні

заряджені частинки, які рухаються під прямим кутом до ліній магнітної індукції, діє сила, як і на електричний струм в провіднику. Вона змушує частку рухатися по круговій орбіті, радіус якої дається виразом

$$R = mv/eB, \quad (2.3)$$

де m - маса частинки, v - її швидкість, e - її заряд, а B - магнітна індукція поля. Частота такого кругового руху дорівнює

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{m} \quad (2.4)$$

де f вимірюється в герцах, e - в кулонах, m - в кілограмах, B - в теслах. Ця частота характеризує рух заряджених частинок в речовині, що знаходиться в магнітному полі. Обидва типи рухів (прецесія і рух по кругових орбітах) можна порушити змінними полями з резонансними частотами, рівними «природним» частотам, характерним для даного матеріалу. У першому випадку резонанс називається магнітним, а в другому - циклотронним (з огляду на схожість з циклічним рухом субатомної частки в циклотроні). [14]

Говорячи про магнітні властивості атомів, необхідно особливо зупинитися на їх моменті імпульсу. Магнітне поле діє на обертовий атомний диполь, прагнучі повернути його і встановити паралельно полю. Замість цього атом починає прецесіювати навколо напрямку поля (рис. 2.10) з частотою, що залежить від дипольного моменту і напруженості прикладеного поля.

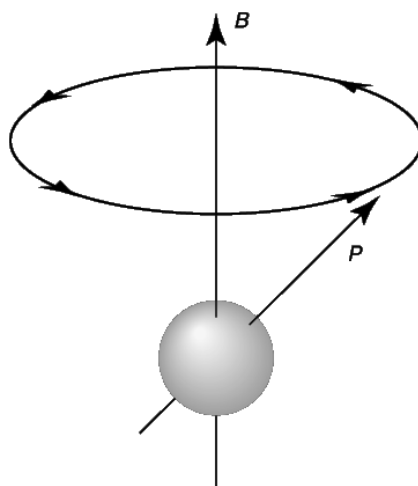


Рис. 2.10 Прецесія атому

Принципова схема установки для спостереження ядерного магнітного

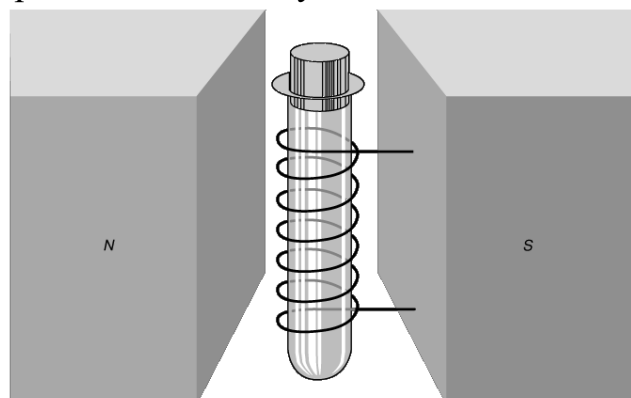


Рис. 2.11 Принципова схема установки

резонансу (ЯМР) представлена на рис. 2.11. У однорідне постійне поле між полюсами вводиться досліджуване речовина. Якщо потім за допомогою невеликої котушки, що охоплює

пробірку, порушити радіочастотне, на певній частоті, рівній частоті прецесії всіх ядерних «гіроскопів» зразка.[15]

Вимірювання схожі з налаштуванням радіоприймача на частоту певної станції.

Методи магнітного резонансу дозволяють досліджувати не тільки магнітні властивості конкретних атомів і ядер, але і властивості їх оточення. Справа в тому, що магнітні поля в твердих тілах і молекулах неоднорідні, оскільки спотворені атомними зарядами, і деталі ходу експериментальної резонансної кривої визначаються локальним полем в області розташування прецесіруючого ядра. Це і дає можливість вивчати особливості структури конкретного зразка резонансними методами. [16]

Магнітне поле, створюване будь-якої конфігурації струмів, можна обчислити, користуючись формулою Біо - Савара - Лапласа для магнітної індукції поля, створюваного елементом струму. Нижче наводяться формули для ряду простих випадків. Магнітна індукція (в теслах) поля, створюваного довгим прямим проводом з струмом I (ампер), на відстані r (метрів) від проводу дорівнює

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

Індукція в центрі кругового витка радіуса R з струмом I дорівнює (в тих же одиницях):

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R} \quad (2.6)$$

Щільно намотана котушка проводу без залізного сердечника називається соленоїдом. Магнітна індукція, створювана довгим соленоїдом с числом витків N в точці, досить віддаленій від його кінців, дорівнює

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L} \quad (2.7)$$

Тут величина NI / L є число ампер (ампер-витків) на одиницю довжини соленоїда. У всіх випадках магнітне поле струму направлено перпендикулярно цьому струму, а сила, що діє на струм в магнітному полі, перпендикулярна і току, і магнітному полю. [17]

Поле намагніченого залізного стрижня схоже, з зовнішнім полем довгого соленоїда з числом ампер-витків на одиницю довжини, відповідним току в атомах на поверхні намагніченого стержня, оскільки струми усередині стержня взаємно компенсуються (рис. 23). На ім'я Ампера такий поверхневий струм зветься амперівским. Напруженість магнітного поля H_a , створювана амперівским струмом, дорівнює магнітному моменту одиниці об'єму стержня M . [18]

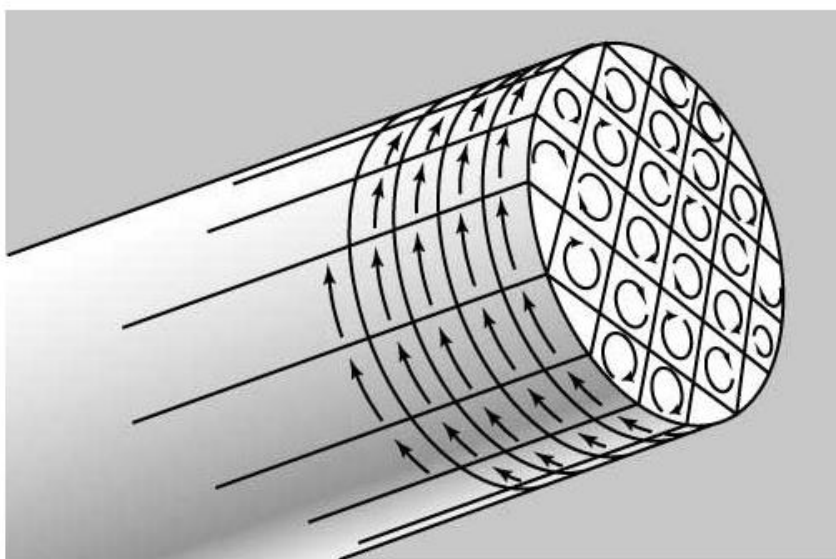


Рис. 2.12 Струми у середині стержня

2.2 Взаємодія постійних магнітів

Як добре відомо, магніти з однаковими полюсами відштовхуються, а якщо полюса різні, то притягуються. Всілякі магніти мають свої магнітні поля, та вони ними взаємодіють з іншими магнітами, цим легко пояснити взаємодію магнітів.

Коли електрон рухається, він утворює елементарні магнітні поля. І якщо шматок заліза внести в зовнішнє магнітне поле, то все елементарні магнітні поля в цьому залізі орієнтуються однаково у зовнішньому магнітному полі, утворюючи власне магнітне поле шматка заліза. Так, якщо прикладена зовнішнє магнітне поле було досить сильним, то після його відключення шматок заліза стане постійним магнітом. [20]

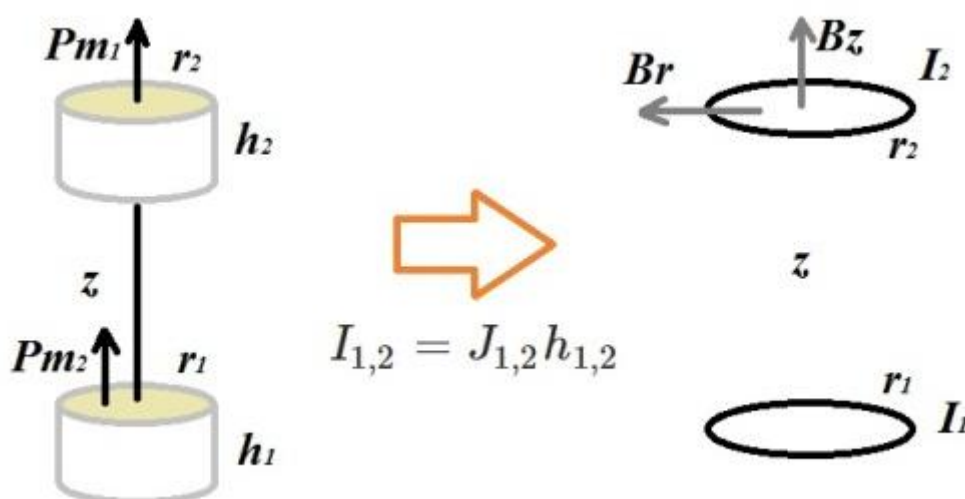


Рис. 2.13 Взаємодія двох магнітів

Знання форми і намагніченості постійного магніту дозволяє для розрахунків замінити його еквівалентною системою електричних струмів намагнічування.

Така заміна можлива як при розрахунку характеристик магнітного поля, так і при розрахунках сил, що діють на магніт з боку зовнішнього поля. Для прикладу проведемо розрахунок сили взаємодії двох постійних магнітів.

Нехай магніти мають форму тонких циліндрів, їх радіуси позначимо r_1 і r_2 , товщини h_1 , h_2 , осі магнітів збігаються, відстань між магнітами позначимо z , будемо вважати, що воно значно більше розмірів магнітів.

Виникнення сили взаємодії між магнітами пояснюється традиційним способом: один магніт створює магнітне поле, яке впливає на другий магніт.

Для розрахунку сили взаємодії подумки замінимо магніти з однорідною намагніченістю J_1 і J_2 круговими струмами, поточними по боковій поверхні циліндрів. Сили цих струмів висловимо через намагніченості магнітів, а їх радіуси будемо вважати рівними радіусів магнітів.

$$I_{1,2} = J_{1,2} h_{1,2} \quad (2.8)$$

Розкладемо вектор індукції B магнітного поля, що створюється першим магнітом в місці розташування другого на дві складові: осьову B_z , спрямовану вздовж осі магніту, і радіальну B_r - перпендикулярну їй.

Для обчислення сумарної сили, що діє на кільце, необхідно подумки розбити його на малі елементи $|\Delta|$ і підсумувати сили Ампера, що діють на кожні такий елемент.[20]

Використовуючи правило лівої руки, легко показати, що осьова складова магнітного поля призводить до появи сил Ампера, що прагнуть розтягнути (або стиснути) кільце - векторна сума цих сил дорівнює нулю.

Наявність радіальної складової поля призводить до виникнення сил Ампера, спрямованих уздовж осі магнітів, тобто до їх тяжінню або відштовхуванню.

Оскільки система, що розглядається, має осьову симетрію, то модуль радіальної складової постійний у всіх точках кільцевого струму другого магніту. Отже, проекція сили, що діє на другий магніт, з урахуванням правила лівої руки, визначається формулою

$$F = -I_2 B_r l = -I_2 B_r 2\pi r_2 \quad (2.9)$$

Позитивний напрямок сили відповідає тяжінню магнітів, позитивний напрямок струму традиційно - проти годинникової стрілки. Магнітне поле, створюване першим магнітом, еквівалентно полю кругового струму. В рамках зроблених наближень ($z \gg r, h$), осьова складова поля визначається формулою

$$B_z = \frac{\mu_0 p_{m1}}{2\pi z^3}, \quad (2.10)$$

де $p_{m1} = I_1 S_1 = J_1 h_1 \pi r_1^2 = J_1 V_1$ - Магнітний момент першого магніту (V_1 - його об'єм).

Радіальну складову поля ми знайшли за допомогою теорії про магнітний потік, в місці розташування другого кругового контуру вона дорівнює

$$B_r = -\frac{r_2}{2} \cdot \frac{\Delta B_z}{\Delta z} = \frac{3\mu_0 p_{m1}}{4\pi z^4} r_2 \quad (2.11)$$

Зменшення осьової складової поля призводить до появи позитивної (спрямованої від осі) складової поля.

Важливо підкреслити, що сила взаємодії між магнітами визначається швидкістю зміни осьової складової поля $\frac{\Delta B_z}{\Delta z}$, якби поле, створюване першим магнітом було однорідним, то сила, що діє на другий магніт, була б рівною нулю.

Цей висновок можна узагальнити на випадок довільного контуру зі струмом (і на будь-який постійний магніт). Дійсно, сила Ампера, що діє на елемент струму $I \Delta l_k$ дорівнює

$$\Delta \vec{F}_k = I \Delta \vec{l}_k \times \vec{B}, \quad (2.12)$$

для обчислення сили, що діє на контур необхідно підсумувати ці вирази по всіх елементах контура

$$\vec{F} = \sum_k \Delta \vec{F}_k = \sum_k I \Delta \vec{l}_k \times \vec{B} = I (\sum_k \Delta \vec{l}_k) \times \vec{B} = \vec{0} \quad (2.13)$$

При виведенні враховано, що в однорідному полі вектор індукції постійний, тому його можна винести за знак суми, а сума елементів контуру дорівнює нулю, так як всі ці вектори збудовані в замкнуту лінію - кінець останнього збігається з початком першого. Отже, сила діюча на будь-який постійний магніт, що знаходиться в зовнішньому однорідному полі дорівнює нулю. Аналогічно, сила, що діє на електричний диполь з боку однорідного електричного поля також дорівнює нулю, а в неоднорідному полі ця сила пропорційна швидкості зміни поля $\frac{\Delta E}{\Delta z}$

Підставляючи вираз для радіальної складової поля, отримаємо формулу, для обчислення сили взаємодії двох магнітів в даному випадку

$$F = -I_2 \cdot 2\pi r_2 \cdot B_r = -I_2 \cdot 2\pi r_2 \cdot \frac{3\mu_0 p_{m1}}{4\pi z^4} r_2 = I_2 \cdot \pi r_2^2 \cdot \frac{3\mu_0 p_{m1}}{2\pi z^4} = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{2\pi z^4} \quad (2.14)$$

Де $p_{m2} = I_2 S_2 = J_2 h_2 \pi r_2^2 = J_2 V_2$ - магнітний момент другого магніту. Так, наприклад для двох однакових магнітів з розмірами $h = r = 1$ см з намагніченістю $J \approx 4 \cdot 10^5$ А, які перебувають на відстані $z = 5$ см сила взаємодії приблизно дорівнює 0,15 Н.

Звернемо увагу, що в останню формулу в якості характеристик магнітів входять тільки їх магнітні моменти, тому ця формула може застосовуватися для магнітів будь-якої форми, важливо тільки щоб відстань між ними перевищувало їх розміри, і їх магнітні моменти були паралельні. Також слід зауважити, що сила взаємодії між магнітами зворотно пропорційна четвертого ступеня відстані між ними, що є наслідком диполь-дипольного характеру взаємодії (для неіснуючих точкових магнітних зарядів ця сила була б, як зазвичай, обернено пропорційна квадрату відстані).[21]

2.3 Явище левітації та магнітні підвіси

В данному розділі, будемо розглядати теоретичні та технічні питання, та комп'ютерне моделювання взаємодії виско коерцитивних магнітів, а також випадок левітації магнітів. Вільну левітацію можна отримати різними способами, один з них – за рахунок сил, що виникають у магнітному полі. Левітацію такого виду називають магнітним підвісом. Виключення механічного опору, суттєво знижує або повністю виключає проблему тертя. Це дає змогу використовувати можливості магнітного підвісу у багатьох областях науки та техніки. [22]

Використання магнітного підвісу, суттєво підвищує можливості для точніших вимірювань та відкриває можливості для розробки інноваційних та принципово нових приладів для виміру сил тяжіння та інших сил, тиску, густини, витрат речовин та газів, та багато інших. Магнітний підвіс дозволяє значно зменшити похибки гіроскопів та створити більш чутливі акселерометри.

Магнітний підвіс, в першу чергу, може бути використаний для дослідження тих процесів, де механічні зв'язки не є шкідливими, так як порушують природу досліджуваного явища. Прикладом може бути підвіска моделей літаків та ракет, в аеродинамічній трубі. При експериментах, в яких моделі в аеродинамічній трубі потребують опору, що не псують воздушний потік, та при цьому мають велику твердість. Магнітний підвіс моделі в аеродинамічній трубі дозволяє повністю позбутися від усіх викривлень повітряного потоку та робить дослідження сил, що діють на модель - простим та точним.[23]

Великі можливості відкриває застосування магнітного підвісу при балансуванні роторів та візлів машин.

Магнітні упори знаходять застосування в металургії, де дозволяють уникнути хімічні та інші взаємодії виплавлених металів з матеріалом тигля.

Відсутність тертя в магнітних опорах дозволяє створювати виключно довговічні підшипники. Це важливо для звичайних приладів і машин

(наприклад, для лічильників електроенергії) і особливо для апаратури космічних кораблів і штучних супутників Землі. Вимоги по точності, надійності і довговічності, що пред'являються до гіроскопічних системах стабілізації космічних апаратів, дуже високі. Крім зменшення тертя, що приводить до помилок системи орієнтації в космічному просторі, бажано мати підшипник, який зберігає працездатність в умовах глибокого вакууму і низьких температур, тобто в умовах, коли перестає працювати мастило механічних підшипників і через витік газу неможлива робота газових підшипників.

Для отримання левітації недостатньо однієї лише компенсації сили тяжіння та інших сил, що діють на тіло. Положення рівноваги, що досягається при рівності нулю суми діючих на тіло сил, має бути, крім того, стійким.

Початком дослідження проблеми левітації, мабуть, слід вважати 1839 р, у цьому році Ірншоу довів теорему, згідно з якою неможливо стійка рівновага тіла в силовому полі, в якому сила і відстань пов'язані законом, зворотним квадратичному. У 1939 р. Браунбек розглянув систему тіл, в якій діють постійні гравітаційне, електричне і магнітне поля. Згідно з аналізом Браунбека підвіска тіла за рахунок сил магнітного поля при цьому можлива лише для тіл, виготовлених з матеріалу з відносною магнітною проникністю μ , меншою одиниці, тобто діамагнетиків і надпровідників, у яких $\mu = 0$. Це означає, що неможливий стійкий підвіс одного постійного магніту в полі іншого. Звичайно, завжди можна підібрати пару магнітів, розташованих один над іншим і звернених один до одного однойменними полюсами, так щоб сила відштовхування полюсів компенсувала силу тяжіння верхнього магніту. Така рівновага буде стійким по відношенню до вертикальних переміщень і нестійким по відношенню до горизонтальних переміщень. Таким чином, стійкий підвіс не виходить, як це впливає з аналізу Ірншоу і Браунбека.[25]

Стійкий магнітний підвіс можна отримати, якщо ввести автоматичне регулювання напруженості магнітного поля, так щоб при змінах положення тіла забезпечувалася компенсація сили тяжіння та інших діючих на тіло сил.

Стійкий магнітний підвіс можливий і при використанні електродинамічних взаємодій, тобто за рахунок використання сил взаємодії магнітного поля і провідника зі струмом або сил взаємодії двох провідників зі струмами.

На основі всіх цих способів створюються різноманітні системи магнітних підвісів. [26]

2.3.1 Підвіси на постійних магнітах

Принципи роботи, конструкції, розрахунок опор на постійних магнітах і електромагнітах постійного струму однакові і розглядаються тому одночасно. При розгляді опор будемо говорити про постійних магнітах, маючи на увазі, що можуть бути використані і електромагніти з постійними струмами в обмотках.

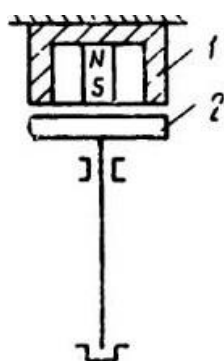


Рис. 2.14

Магнітний підвіс

Всі пристрої розбиваються насамперед на два великі класи: 1) «магніт-магніт» і 2) «магніт - ферромагнетик». Простий пристрій з магнітним розвантаженням наведено на рис. 11. Нерухомий магніт притягує укріплене на Рис. 2.14. Пристрій щую валу феромагнітна магнітної розвантаження. тіло 2.

Сила тяжіння менше сили тяжіння обертового вала підшипника і компенсує лише більшу чи меншу частину сили тяжіння, знижуючи тим самим тертя в

механічних опорах і зменшуючи знос. Стійкий підвіс з повною компенсацією навантаження в цьому пристрої неможливий.[26]

Магнітні підшипники системи «магніт-магніт»

У всіх розглянутих в подальшому магнітних підшипниках в залежності від навантаження виходить або магнітний підвіс, або магнітне розвантаження. Тому розбиття за цими ознаками не проводиться.

Для визначеності будемо, однак, говорити, що у всіх розглянутих підшипниках здійснюється повна компенсація навантаження.

Розглянемо радіальні й упорні підшипники з повною компенсацією навантаження класу «магніт-магніт». І радіальні й упорні підшипники можуть бути виконані при концентричному і при співвісному розташуванні магнітів. Магніти, і при концентричному, і при співвісному розташуванні можуть бути намагнічені в радіальному і в осьовому напрямку.

а) Магнітні радіальні підшипники

У підшипниках цього виду здійснюється магнітний підвіс ротора в радіальному напрямку. Переміщення в напрямку осі обертання в радіальних підшипниках обмежуються механічними підшипниками або якимись іншими способами. Рухомі та нерухомі магніти радіальних підшипників можуть мати відносно один одного різне розташування.

Концентричне розташування магнітів

Концентричне розташування магнітів в радіальних підшипниках зображено на рис. 2.15. Ротори підвішені за рахунок сил відштовхування однойменних полюсів. На рис. 2.15 а), зображені магніти підшипника, намагнічені в радіальному напрямку, на рис. 2.15 б), - в осьовому напрямку. На рис. 2.15 в), зображений підшипник з магнітами, намагніченими в осьовому напрямку, дещо іншої конструкції, запропонованою Хансеном. Тут сили відштовхування і тяжіння прикладені до ротора в одному напрямку. У підшипнику, зображеному на рис. 2.15 г), магніт, закріплений на осі, має намагніченість в осьовому напрямку, а два нерухомі магніти, розташовані концентрично осьового по обидва його боки, намагнічені в радіальному напрямку.

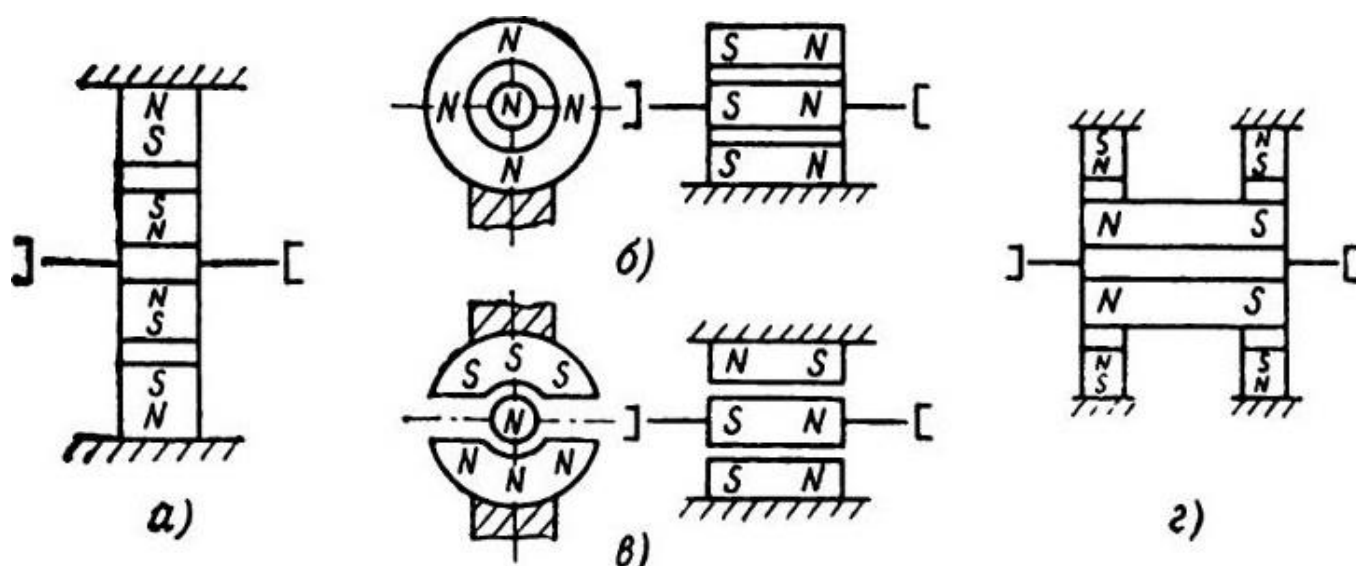


Рис. 2.15 Різні магнітні підшипники

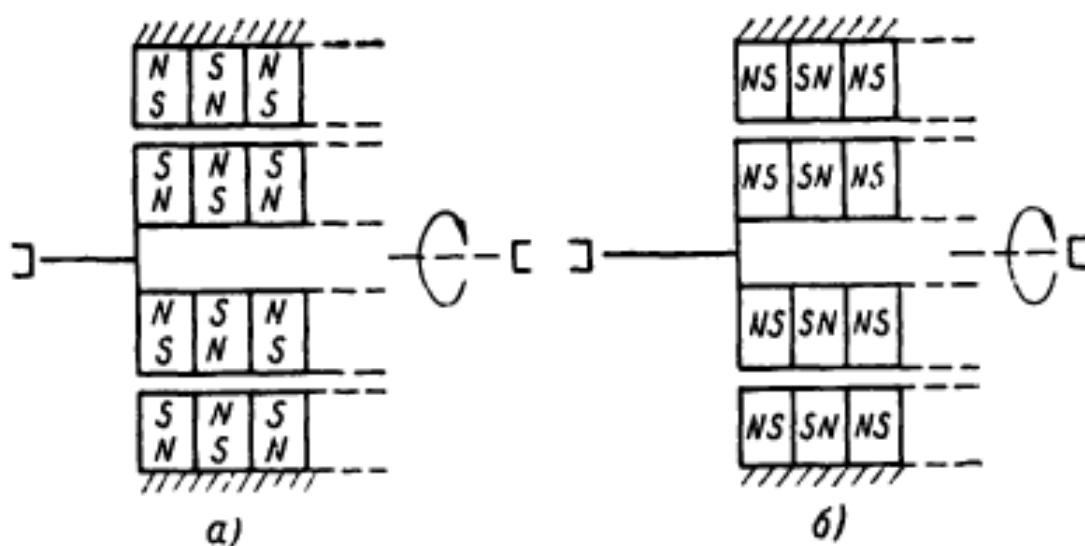


Рис. 2.16 Модифікації підшипників

На рис. 2.16 а) і б), приведені модифікації підшипників, зображених відповідно на рис. 2.15, а) і б). Ротори і статори підшипників, наведених на рис. 2.16, виконані у вигляді набору кілець однакової товщини, намагнічених в радіальному і осьовому напрямках (рис. 2.16 б)).

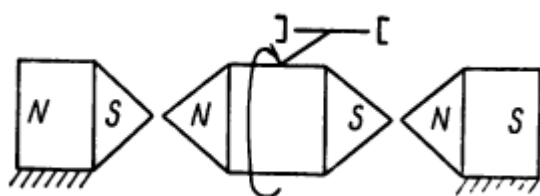


Рис. 2.17 Радіальний підшипник

Полярність намагнічування сусідніх кілець різна. Стала радіальна рівновага забезпечується за рахунок відштовхування однойменних полюсів. Конструкція підшипника, зображеного на рис. 2.16 а), запропонована у 1954 р. Баерманом. Проведений Беккерсом теоретичний аналіз цього підшипника показує, що набір кілець в статорі і роторі забезпечує велику відновлювальну силу, ніж в підшипнику, наведеному на рис. 2.15 а), з одним кільцем ротора і одним кільцем статора, при однаковій намагніченості і геометричних розмірах.[27]

Співвісне розташування магнітів

На рис. 2.17 наведено радіальний підшипник з співвісним розташуванням магнітів ротора і статора. Різнойменні полюси ротора і статора підшипника звернені один до одного і мають конічну форму. Відновлювальна радіальна сила в підшипнику з'являється при зсуві ротора в радіальному напрямку за рахунок притягування протилежних полюсів.[27]

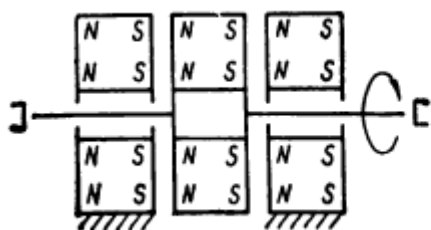


Рис. 2.18 Радіальний підшипник

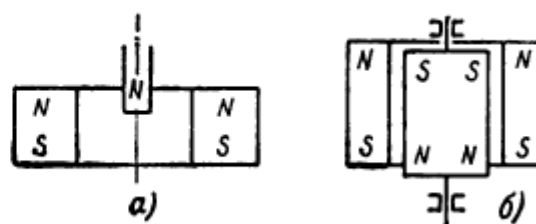


Рис. 2.19 Підшипник відштовхування

Рівновага в осьовому напрямку не стабільна і забезпечується механічними упорами, умовно показаними на Рис.2.17.

Ще одна конструкція радіального підшипника приведена на рис. 2.18. При зміщенні ротора цього підшипника в радіальному напрямку з'являється радіальна складова сили тяжіння різнойменних полюсів ротора і статора, яка і забезпечує стабілізацію. [27]

б) Магнітні упорні підшипники

Підшипники цього типу забезпечують компенсацію осьового навантаження, а для обмеження переміщень в радіальному напрямку застосовуються додаткове центрування, наприклад, у вигляді звичайних механічних підшипників.[28]

Концентричне розташування магнітів

Підшипники з концентричних розташуванням магнітів працюють з використанням сил відштовхування однойменних полюсів (рис. 2.19 а)) і з використанням сил тяжіння різнойменних полюсів (рис. 2.19 б)) Конструкція; зображена на рис. 2.19 б), використовувалася ще в 1948 р фірмою «Дженерал електрик» (США) в лічильниках електричної енергії для підвісу рухомої частини приладів. Це дозволило зменшити питомий тиск в графітових

втулках підшипника диска лічильника типу до $70 \cdot 10^4 \text{ Н / м}^2$ У упорних підшипниках лічильників старого типу тиск становив $140 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. Різке зменшення тиску і зниження тертя істотно зменшили знос підшипника обертання диска лічильника.

Співвісне розташування магнітів

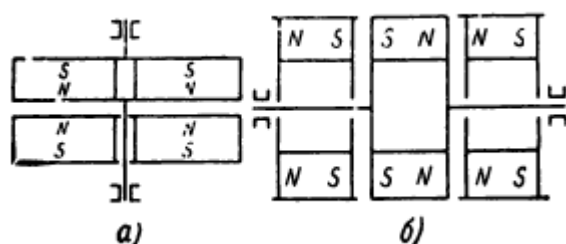


Рис. 2.20 Співвісний підшипник

в підшипнику на рис. 2.20,б) - сили відштовхування компенсують навантаження уздовж горизонтальної осі.

Підшипники з співвісним

розташуванням магнітів зображені на рис. 2.20. У підшипнику, зображеному на рис. 2.20 а), сили відштовхування однойменних полюсів компенсують навантаження уздовж вертикальної

Магнітні підшипники системи «магніт-ферромагнетика»

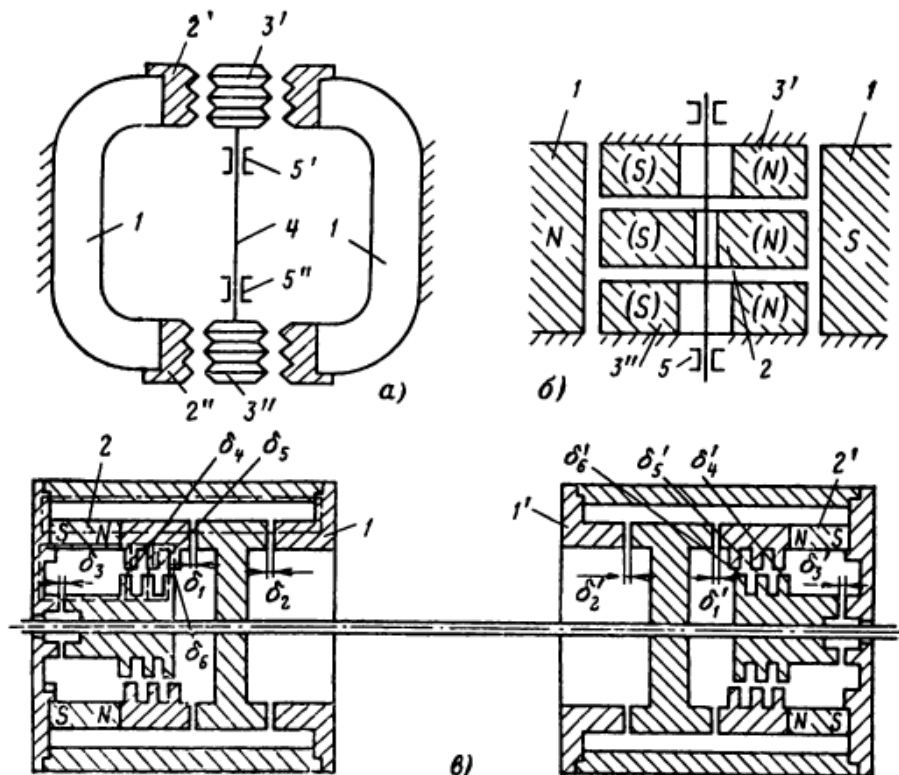


Рис. 2.21 Різні конструкції упорних підшипників

На рис. 2.21 а) і б), зображено дві конструкції упорних підшипників. У підшипнику, наведеному на рис. 2.21 а), полюсні сторони 2' і 2'' магніту 1 і феромагнітні сердечники 3' і 3'' мають зубці, що формують неоднорідне поле в повітряному проміжку. Зсув вала 4 в осьовому напрямку викликає поява вертикальних складових сил магнітного поля в напрямку, протилежному зсуву вала. Ці складові сил тяжіння компенсують силу тяжіння вала і прикладається до нього поздовжнє навантаження. Радіальні переміщення вала обмежуються механічними упорами 5' і 5''. [29]

У підшипниках, зображеному на рис. 2.21 б), рухомий диск 2, що підвішується і два нерухомих диска 3' і 3'' з феромагнітного матеріалу вміщуються в поле нерухомого магніту 1 і завдяки цьому намагнічуються. Сили відштовхування однойменних полюсів феромагнітних дисків, що намагнічуються і забезпечують компенсацію сили тяжіння і осьового навантаження. Радіальні зміщення частини підшипника обмежуються упорами 5.

На рис. 2.21 в), приведена конструкція радіально-упорного підшипника класу «магніт-феромагнетик». У кожній з нерухомих муфт 1, 1' є постійний магніт 2, 2' циліндричної форми, намагнічений в осьовому напрямку. Всі заштриховані частини нерухомих муфт і роторів виконані з феромагнітного матеріалу. При зміщенні ротора в радіальному напрямку в зазорах 61, 62, 63 і 61, 62, 63 виникають складові сил тяжіння, спрямовані в бік, протилежний зміщенню, т. Е. Центруючі ротор в радіальному напрямку. Осьове центрування забезпечується поздовжніми складовими сил тяжіння в зазорах 64, 65, 66 і 64, 65, 66. Торці рухомих і нерухомих полюсів в цих зазорах роком дещо зміщено щодо одне одного, як це показано на рис. 1-8, в, в результаті чого поздовжні складові сил в цих зазорах мають протилежні напрямки і компенсують один одного. При зміщенні ротора, наприклад, вліво поздовжні складові сил в зазорах 64, 65, 66 діють в напрямку, протилежному зсуву. У зазорах 6'', 6'5, 6'6 ці складові зменшуються, оскільки торці полюсів зазорів 6'', 6'5, 6'6

наближаються одна до одної. Зсув ротора вправо зменшує поздовжні складові сил в зазорах 64, 65, 66 і збільшує ці складові в зазорах 6'4, б 5, б 6. Ці останні спрямовані проти зсуву і забезпечують осьове центрування ротора.[29]

Магнітні упори з поступальним рухом рухомої частини

Підвіс на постійних магнітах використовується і в системах з поступальним рухом частини пристрою, що підвішується. У нашій країні і за кордоном ведуться роботи зі створення транспортних систем з підвішуванням екіпажу, який врівноважується силами відштовхування постійних магнітів. Одна зі схем підвісу приведена на рис. 2.8. Постійні магніти прямокутного перетину 1, намагнічені в вертикальному поперечному напрямку, розташовуються в полотні шляху 2 і на екіпажі 3, так що спрямовані один до одного однойменними полюсами. У горизонтальному напрямку підвіс хиткий і стабілізація здійснюється роліками 4, що котяться по направляючій рейці 5. До теперішнього часу реалізований ряд експериментальних моделей подібних транспортних систем.

Розрахункові співвідношення

Розрахунки підшипників системи «магніт - магніт» вимагають визначення сил взаємодії двох або більшого числа магнітів. Беккерсом проведено теоретичний аналіз радіального підшипника, зображеного на рис. 2.16 а). Можна вважати, що підшипник, наведений на рис. 2.15 а), є окремим випадком конструкції, показаної на рис. 2.16 а). Тому з аналізу Беккерсу як окремий випадок впливають співвідношення для конструкції, наведеної на рис. 2.15 а).

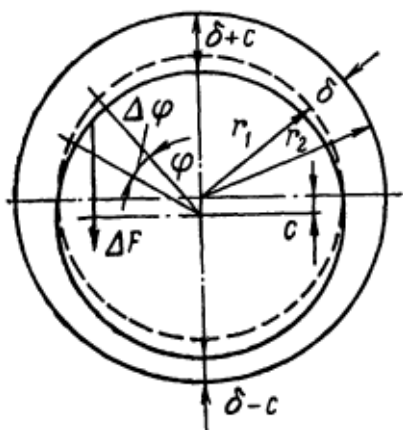


Рис. 2.22 Кільце

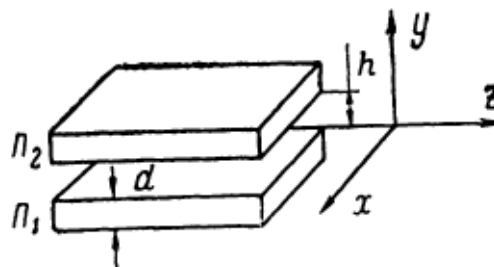


Рис. 2.23 Два плоских магніта

Припустимо вважати, що відштовхувальна сила, що діє на малий ділянку внутрішнього кільця (рис. 2.22), створюється магнітним полем обмеженою області зовнішнього кільця, що знаходиться в безпосередній близькості від цієї ділянки. Якщо радіуси кілець значно більше зазору, то можна вважати, що зазор в кожному невеликому секторі утворений двома площинами. Це означає, що при розрахунку радіальної сили можна виходячи з співвідношень, одержуваних для двох плоских постійних магнітів (рис. 34). Зводячи дослідження взаємодії співвісних циліндричних магнітів до взаємодії двох плоских магнітів, доцільно розглядати випадок зміни намагніченості в напрямку поверхонь по прямокутному або гармонійним законом.

Спрямовуючи довжину хвилі закону розподілу до нескінченності, отримуємо випадок взаємодії однієї пари полюсів, тобто приходимо до конструкції, зображеної на рис. 2.15 а). При цьому з'являється можливість зіставлення характеристик конструкцій, наведених на рис. 2.15 а) й рис. 2.16 а).

Дотримуючись Беккерсу, розглянемо спочатку взаємодія двох плоских магнітів (рис. 2.23)

Сила, з якою магніт Π_1 , діє на магніт Π_2 , визначається співвідношенням.

$$F = -\frac{\partial W}{\partial y} \quad (2.15)$$

Де W – потенційна енергія магнітного поля, що створює магніт P_2 , у магнітному полі магніта P_1 .

Вважаємо, що вектор намагніченості другого магніту J_2 і вектор напруженості магнітного поля, обумовленого першим магнітом H_1 спрямовані уздовж осі y в протилежні сторони. При цьому

$$W = \int_V J_2 H_1 dV = - \int_V J_2 H_{1y} dV \quad (2.16)$$

Складова H_{1y} вектора напруженості магнітного поля H_1 визначається через скалярний магнітний потенціал U_1 :

$$H_{1y} = - \frac{\partial U_1}{\partial y} \quad (2.17)$$

Де

$$U_1(x, y, z) = - \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_V \frac{J_1 r}{r^3} dV \quad (2.18)$$

Де r – радіус вектор точки x, y, z яка знаходиться всередині елементу об'єму dV . Беручи до уваги, що намагніченість пластини P_1 , змінюється вздовж осі z за законом

$$J_1 = J_0 \cos \frac{2\pi z}{\lambda} \quad (2.19)$$

Де λ – довжина хвилі розподілу намагніченості вздовж осі z .

Інтегрування по всьому об'єму, відповідно до (1-4), з урахуванням (1-5) приводить до результату.

$$U_1 = \frac{J_0 \lambda}{4\pi\mu_0} \left(1 - e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}} \right) e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}} \cos \frac{2\pi z}{\lambda} \quad (2.20)$$

Розподіл намагніченості пластини P_2 може мати зсув по фазі відносно розподілу намагніченості P_1 :

$$J_2 = J_0 \cos \frac{2\pi(z+z_0)}{\lambda} \quad (2.21)$$

Підставляємо в співвідношення (2.2) складову напруженості H_{1y} , виражену через магнітний потенціал, який в свою чергу визначається виразом (2.6), і намагніченість J_2 , виражену у вигляді (2.7). Отримавши в результаті

вираз для енергії V і скориставшись співвідношенням (2.1), отримаємо вираз для сили, що діє на одиницю поверхні:

$$f_y = -\frac{J_0^2}{4\mu_0} \left(1 - e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}}\right) e^{-\frac{2\pi h}{\lambda}} \cos \frac{2\pi z_0}{\lambda} \quad (2.22)$$

З (2.8) випливає, що при $\lambda \rightarrow 0$, $f_y \rightarrow 0$. В цьому випадку сусідні ділянки з протилежною полярністю нескінченно близькі і нейтралізують один одного.

При також $\lambda \rightarrow \infty$, також $f_y \rightarrow 0$. Останнє виходить внаслідок того, що розглядаються нескінченно протяжні пластини. Дійсно, при довжині хвилі, яка прагне до нескінченності, напруженість постійна уздовж пластини, але замкнуті силові лінії повинні мати нескінченну довжину і, отже, напруженість може бути лише нульовою. Розгляд пластин кінцевих розмірів при однорідної намагніченості призводить до нульового значення сили відштовхування.

З (2.8) видно, що найбільша відштовхувальна сила має місце при фазовому зсуві $z_0 = \lambda/2$. У цьому випадку ділянки з однаковим значенням і зустрічним напрямком намагніченості пластин Π_1 і Π_2 розташовані один під одним.[30]

При $z=0$ виходить максимальна притягуюча сила. Як випливає з (2.8), сила зростає за абсолютним значенням зі збільшенням відношення $\frac{2\pi d}{\lambda}$, тому товщина d опори повинна бути досить великою. Вважаючи $e^{-2\pi d/\lambda} \ll 1$ (досить велике значення d) і $z_0 = \lambda/2$, отримуємо для максимальної відштовхувальної сили:

$$f_y = \frac{J_0^2}{4\mu_0} e^{-\frac{2\pi h}{\lambda}} \quad (2.23)$$

Використовуємо отримані співвідношення для розрахунку радіального підшипника у варіанті коли зазор малий у порівнянні з радіусами внутрішнього і зовнішнього кілець.

Радіальна сила, що діє на елемент поверхні (рис. 2.8), дорівнює:

$$\Delta F_r = f_r l r_0 \Delta \varphi \quad (2.24)$$

Де l – довжина елемента вздовж осі, $r_0 = (r_1 + r_2)/2$ – середній радіус.

Зазор між поверхнями елемента в секторі $\Delta\varphi$

$$h = \delta + c \cos\varphi \quad (2.25)$$

Складова сила ΔF_r , направлена в сторону, протилежну зсуву, дорівнює:

$$\Delta F = \Delta F_r \cos\varphi \quad (2.26)$$

Інтегрування виразу (1-12) по φ , від 0 до 2π (або в силу симетрії від 0 до π), з урахуванням (1-10) та (1-11) приводить до виразу, для складової сили:

$$F = -A e^{3\beta} \int_0^\pi e^{-\beta' \cos\varphi} \cos\varphi d\varphi \quad (2.27)$$

де

$$A = \frac{J_0^2 l r_0}{2\mu_0} \quad \beta = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad \beta' = \frac{2\pi c}{\lambda}$$

Максимальне значення результуючої відновлювальної сили виходить при $c = \delta$. Найбільше можливе значення F_{\max} виходить при $\beta = 1$, тобто при перевищенні товщини кожного кільця набору (товщина кільця дорівнює λ) зазору в 2π раз. Для гармонійного розподілу намагніченості вздовж осі

$$F_{\max} = 0,655 \frac{J_0^2 l r_0}{2\mu_0} \quad (2.28)$$

Розгляд дискретної функції зміни намагніченості вздовж ося z , тобто

$$\left. \begin{aligned} J &= +J_0 \text{ при } (n-1)\lambda < z < \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda; \\ J &= -J_0 \text{ при } \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda < z < n\lambda, \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

приводить до значення відновлювальної сили приблизно в два рази більшу у порівнянні з випадком синусоїдального розподілу намагніченості:

$$F_{\max} = 1,2 \frac{J_0^2 l r_0}{2\mu_0} \quad (2.30)$$

Розрахунок відновлювальної сили опорного підшипника, зображеного на рис. 2.6, а, проведено раніше. Відштовхувальна сила пари циліндричних магнітів зі зустрічно розташованими полюсами, як і в попередньому випадку, визначається через потенційну енергію поля верхнього магніту в поле нижнього, тобто співвідношенням (2.14). Результат (2.15) з урахуванням

(2.16) - (2.18) в циліндричних координатах призводить до вираження для відновлювальної сили виду

$$F = \frac{J_1 J_2 \mu_0}{2} f(r_1, r_2, h, d), \quad (2.31)$$

де J_1, J_2 – намігнечонності магнітів, r_1 - внутрішній радіус циліндричних магнітів, r_2 – зовнішній радіус, h – відстань між магнітами у вертикальному положенні, d – товщина кожного магніту.[31]

Отриманий вираз для F дуже громіздко і малоприслатно для практичного використання. Тому при дослідженні руху підшипника відновлювальну силу доводиться визначати експериментально. Якщо є необхідність мати аналітичний вираз для сили, експериментально отриману залежність апроксимують відповідними аналітичними формулами. Можуть використовуватися подання виду

$$F = k e^{-\lambda h} \quad (2.32)$$

або

$$F = \frac{a}{b+h} \quad (2.33)$$

де k, λ, a, b – коефіцієнти, що враховують конструктивні розміри і намагніченість магнітів.

Отримані співвідношення для відновлювальної сили опорного підшипника, зображеного на рис. 2.6, а), можуть бути використані і для визначення відновлювальної сили двостороннього опорного підшипника (рис. 2.6, б)

2.3.2 Матеріали для постійних магнітів

Основною проблемою при конструюванні магнітних опор на постійних магнітах є вибір магнітного матеріалу.

В опорах, які використовують сили відштовхування, поля магнітів спрямовані зустрічно, тому є небезпека взаємного розмагнічування магнітів. Щоб уникнути її, вони повинні мати хорошу стійкість до розмагнічування, високу коерцитивну силу. Матеріал магніту повинен бути магнітожорстким, він повинен мати максимальну залишкову індукцію B , і максимальну коерцитивну силу H_c . Якість матеріалу для магнітного підвісу характеризується його енергією BH , причому найбільш вигідні умови роботи підвісу досягаються в точці, що відповідає максимальному значенню енергії $BH_{\text{макс}}$. Крім зазначених властивостей від магнітного матеріалу для підвіски вимагається мати малу питому вагу, високу температурну стабільність характеристик, міцність, низька вартість. Крім того, в ряді випадків необхідно мати великий електричний опір, щоб уникнути появи великих вихрових струмів при високих швидкостях руху.[32]

Зазначеним вимогам значною мірою задовольняє керамічний матеріал - ферит барію ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$). При його виготовленні використовується наступна технологія: подрібнений карбонат барію змішується з порошком оксиду заліза, пресується, спікається, знову розмелюють і знову пресується і спікається. Барієвий феррит не має тенденції до хімічних змін і володіє високою стабільністю властивостей в часі, тобто великим терміном служби. Він має велику коерцитивну силу, що робить його нечутливим до впливу магнітних полів, тобто його важко розмагнітити.

Питома маса барієвого фериту досить нізка- 4,5- 5,0 г / см³, що дозволяє зменшувати масу рухомої частини опори. Питомий електричний опір- $10^5 - 10^6$ ом / см.

Барієвий феррит, як і будь-яка кераміка, крихкий. Тому магніти з барієвого фериту укладають в захисні оболонки з міцніших матеріалів. Іншим

недоліком барієвого фериту є високий негативний температурний коефіцієнт залишкової індукції: при збільшенні температури на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ магнітний потік зменшується на $0,2\%$. Зміна значення потоку призводить до зміни сили магніту і до зміни положення рухомої частини підшипника, що неприпустимо, наприклад, в лічильниках електричної енергії. Для компенсації цих змін в конструкції лічильника, застосовується бандаж з температурно-чутливого магнітного сплаву, який вдягають на нерухомий магніт опори. За рахунок цього підтримується сталість повітряного зазору між рухомим і нерухомим магнітами опори лічильника при зміні температури від -20 до $+500^{\circ}\text{C}$.

Ферити барію аналогічні за своїми властивостями ферити стронцію ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Меншою залежністю намагніченості від температури і меншою питомою вагою ($3,3\text{--}4,0\text{ г / см}^3$) володіють ферити кобальту ($\text{CaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$). Однак магніти з фериту кобальту дорожче барієвих і у них нижче коерцитивна сила.[33]

Видатними властивостями володіють постійні магніти на базі рідкоземельних-кобальтових і платиново-кобальтових матеріалів. Серед цих матеріалів виділяються: празеодім-кобальт (PrCO_5), самарій-кобальт (SmCO_5), платина-кобальт (CoPt). Постійні магніти з PrCO_5 володіють, наприклад, залишковою магнітною індукцією вдвічі більшою, ніж барієві ферити. Оскільки сила взаємного відштовхування двох магнітів пропорційна добутку їх намагніченостей, то зусилля відштовхування при цьому в чотири рази перевищує зусилля аналогічної пари барієвих феритів при тій же відстані між ними.[34]

Коерцитивна сила самарій-кобальтових магнітів досягає 9000 Э , а $B_{\text{Hmax}} = 20 \cdot 10^6\text{ Гс} \cdot \text{Э}$. Застосування постійних магнітів на базі рідкісноземельних елементів і платини істотно обмежується їх високою вартістю і технологічними труднощами виготовлення. Проте треба мати на увазі, що обсяги магнітів з цих матеріалів виходять значно менше, ніж з

кобальтових сталей, сплавів альніко і феритів при збереженні того ж магнітного ефекту. Так, диск зі сплаву CoPt діаметром 2 і товщиною 0,05 мм створює такий же магнітний ефект, як і диск з кобальтової сталі діаметром 16 і товщиною 0,4 мм, тобто з обсягом, в 550 разів більшим.[35]

Висновки до розділу II

Після вивчення особливостей та всіх можливих характеристик магнітних об'єктів та магнітних систем, можна зробити певні висновки. Найголовнішим є те, що магніти дуже важливі у багатьох галузях науки та техніки. За допомогою таких систем, можна зменшити велику кількість зусиль, та перейти до автоматизації механічних операцій, що потребують людського втручання, а найголовніше, при таких операціях має місце механічне тертя. Але поведінка магнітів до теперешнього часу досконально невідома. Досить цікавим, є момент левітації, за допомогою відштовхувальної сили магнітних об'єктів. Але такі пристрої, потребують певної точності при зборці, адже сила притягання між різноименними полюсами магнітів досить велика. Тому вивчення магнітних основ є дуже актуальним і до теперешніх часів.

РОЗДІЛ III ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ВИСОКО КОЕРЦИТИВНИХ МАГНІТІВ

3.1 Теоретичне та комп'ютерне вивчення взаємодії двох магнітів

Вивчення взаємодії двох постійних високо коерцитивних магнітів, є основоположним для розуміння фізичних властивостей магнітних систем.

Для теоретичного розрахунку, ми будемо використовувати два метода. Один з них це формульний розрахунок взаємодії вух магнітів. Інший спосіб це комп'ютерне моделювання такої взаємодії.

Для комп'ютерного моделювання можна застосувати різні програми та середовища. Для прикладу візьмемо дві з них. У 3D найбільш вдалою для магнітів є програма Comsol Multiphysics. З неї ми і почнемо моделювання. Після створення візуальної моделі, а саме двох циліндричних магнітів, які розташовані таким чином, що один з них, знаходиться над іншим. Після саме час внести потрібні фізичні закони.

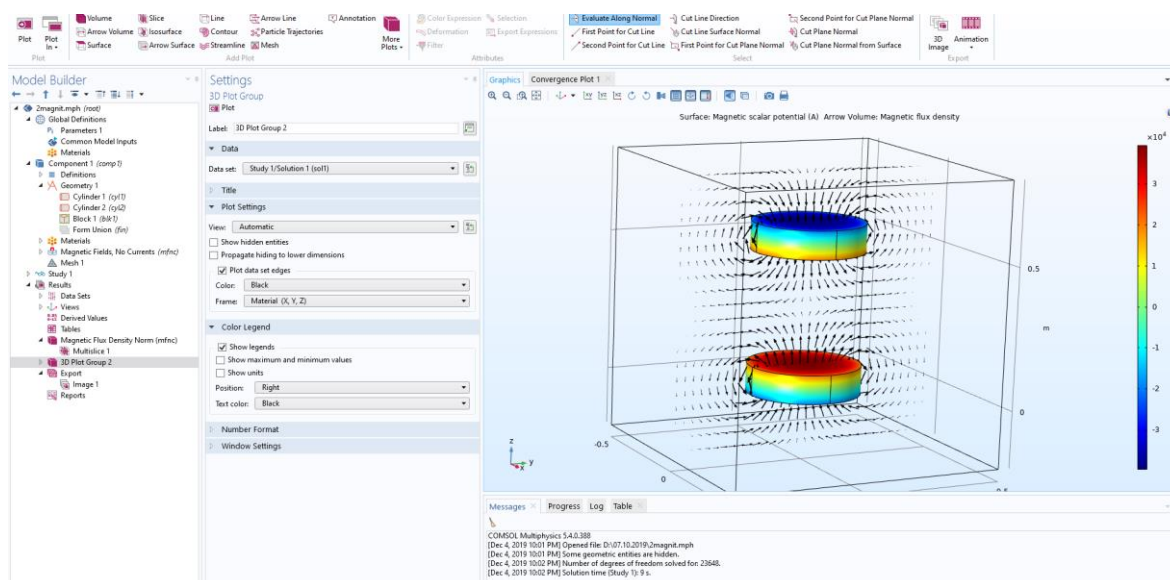


Рис. 3.1 Моделювання двох магнітів у середовищі Comsol

Comsol забезпечує чітке розуміння моделі у 3D, а також візуалізацію випромінювання силових ліній магнітного поля. Добре видно, що зменшуючи відстань між двома магнітами, густина силових ліній збільшується.

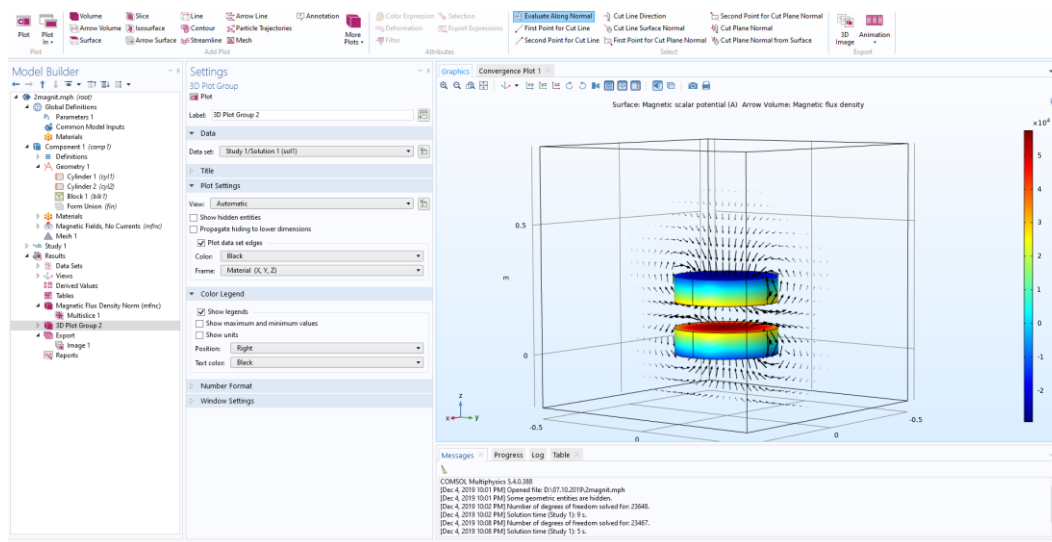


Рис. 3.2 Моделювання двох магнітів у середовищі Comsol

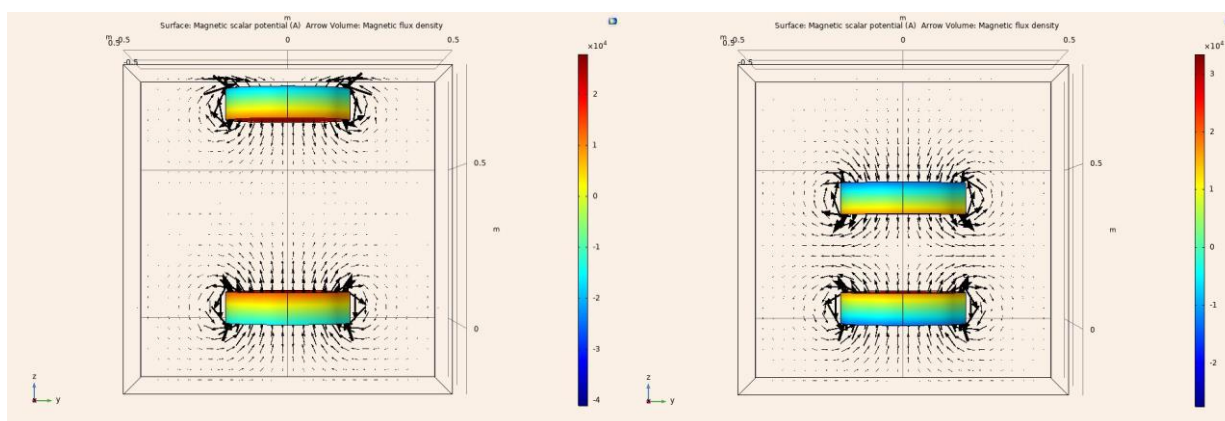


Рис. 3.3 Збільшення відстані між магнітами.

Рис. 3.4 Зменшення відстані між магнітами.

Але, для кінцевого розуміння характеру взаємодії, слід перейти до цільних силових ліній.

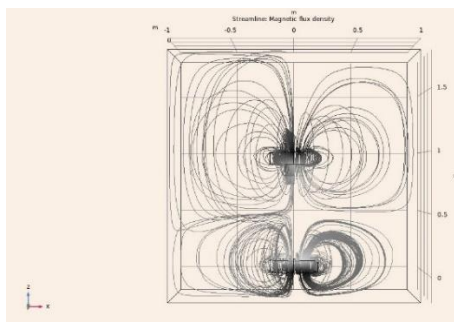


Рис. 3.5 Силлові лінії магнітів

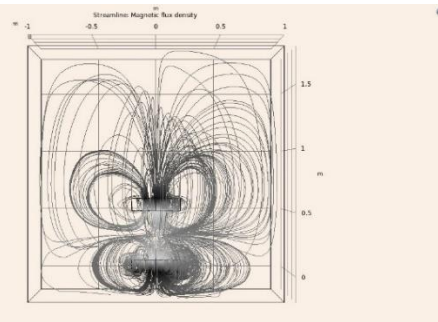


Рис. 3.6 Силлові лінії магнітів

Як можна побачити, залежність щільності, а отже і сили відштовхування, напряду залежить від відстані. Але, за допомогою comsol, не можливо досягти чіткої та простої до сприйняття візуалізації. Також програма має великі складності, під час розрахунку сили відштовхування. Саме через це, доцільним є перехід від 3D программ моделювання у площину 2D.

У цьому є корисним середовище для моделювання FEMM.

Складемо просту модель з двох постійних магнітів.

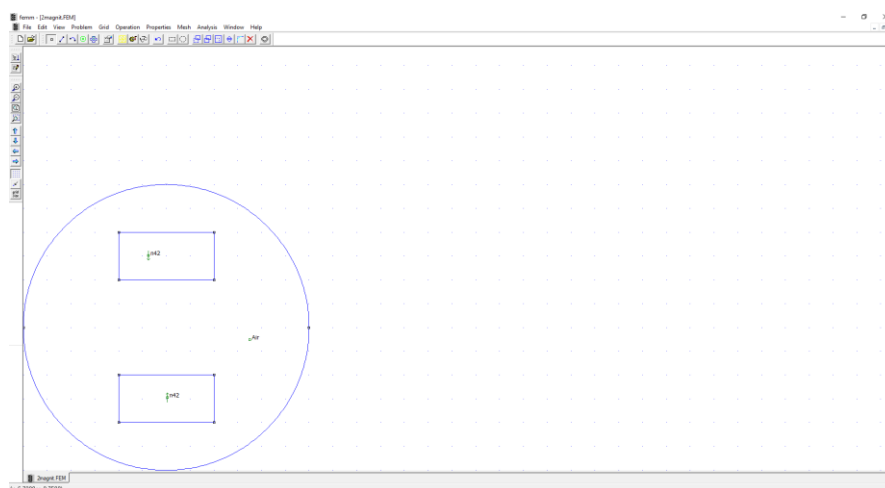


Рис. 3.7 Два постійних магніта

Та після задання характеристик магнітів для обмежуючого контуру (повітря), можна прорахувати взаємодію.

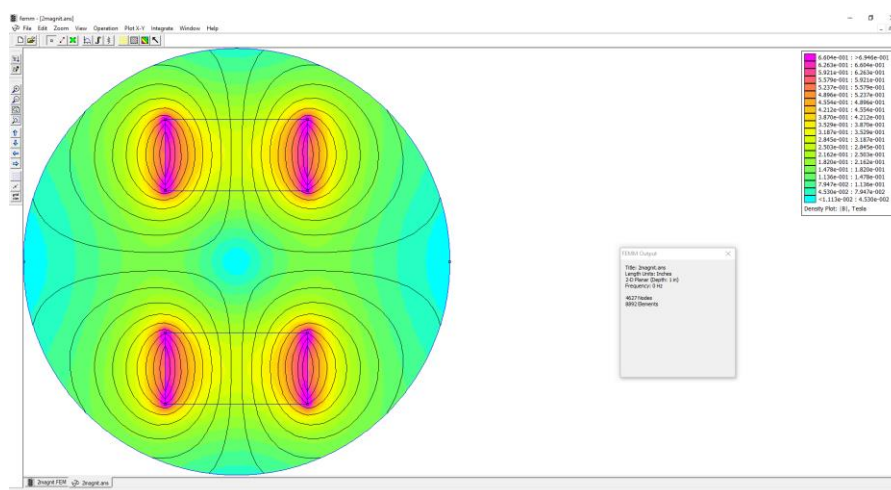


Рис. 3.8 Моделювання двох постійних магнітів

Картинка дійсно, більш чітка та зрозуміла ніж в Comsol.

Для розрахунку повної картини взаємодії двох високо коерцитивних магнітів, слід розрахувати всі можливі розміри магнітів та різні положення магнітів, один відносно одного.

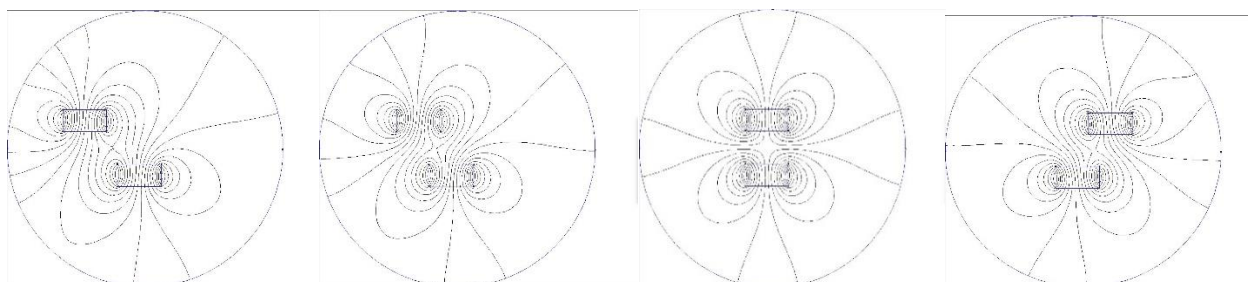


Рис. 3.9

Рис. 3.10

Рис. 3.11

Рис. 3.12

Зсув верхнього
магніту вліво

Зсув верхнього
магніту вліво

Співвісне
розташування

Зсув верхнього
магніту вправо

Під час моделювання можливого положення верхнього магніту, відносно іншого, видно просту залежність, а саме те, що коли магніти мають співвісне положення, існує вертикальна сила відштовхування. Якщо має місце, навіть мінімальне, зміщення в сторону – виникає сила притягання між різними полюсами. І згідно з теорії, магніти повинні зімкнутись один з одним, різними полюсами.

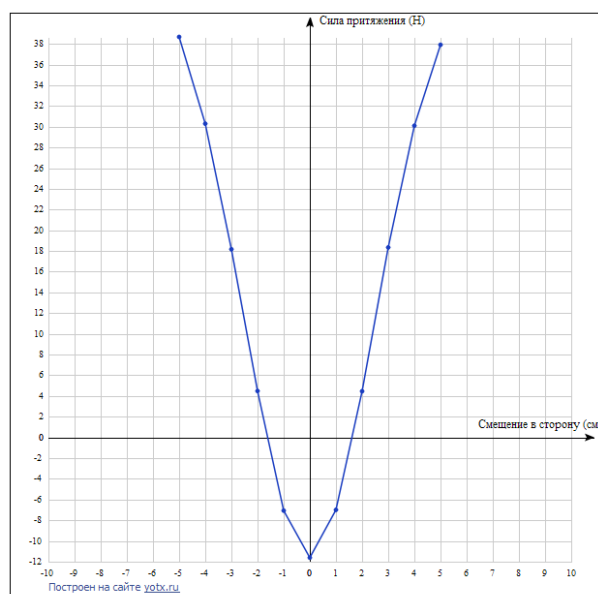


Рис. 3.13 Графік залежності сили притягіння від зсуву верхнього магніту

На графіку видна залежність сили притягіння, в залежності від положення верхнього магніту.

Під час корекції відстані між двома магнітами, маємо три можливих варіанти.

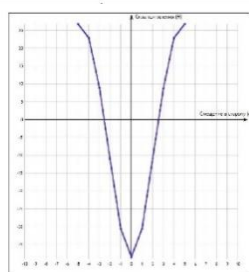
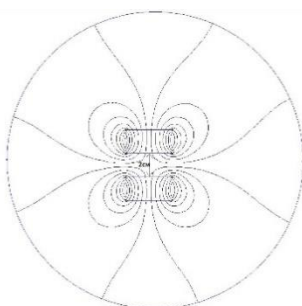


Рис. 3.14 Відстань між магнітам

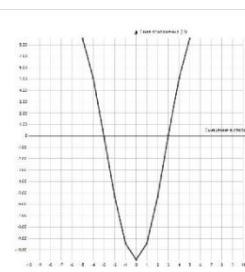
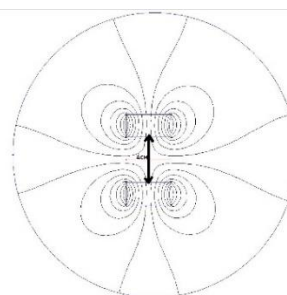


Рис. 3.15 Відстань між магнітами 4 см.

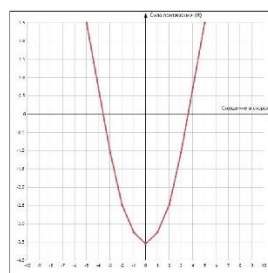
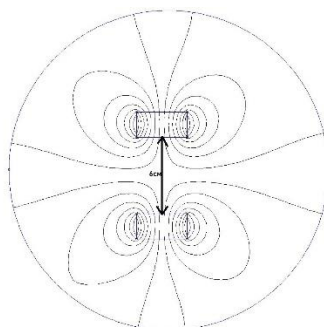


Рис. 3.16 Відстань між магнітами 6 см.

Та якщо зобразити залежність сили притягіння від зсуву верхнього магніту, у трьох можливих відстаней між магнітами, на одному графіку, отримаємо:

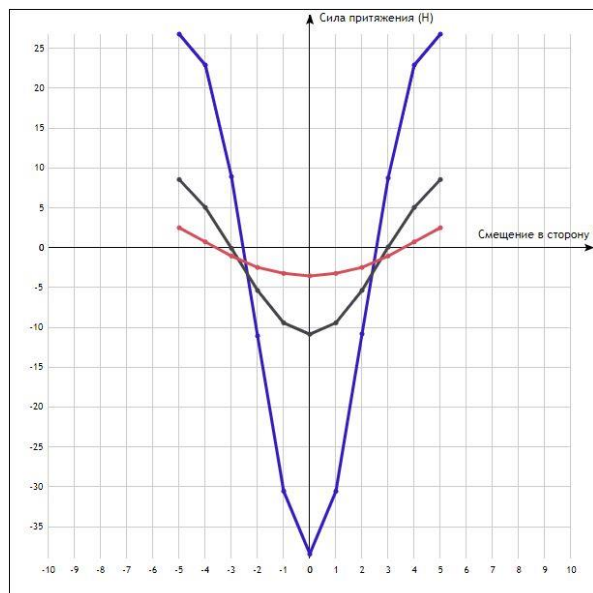


Рис. 3.17 Загальний графік залежності сили відштовхування від відстані між магнітами

Продовжуючи аналізувати можливі розмірів магнітів, отримаємо такі залежності.

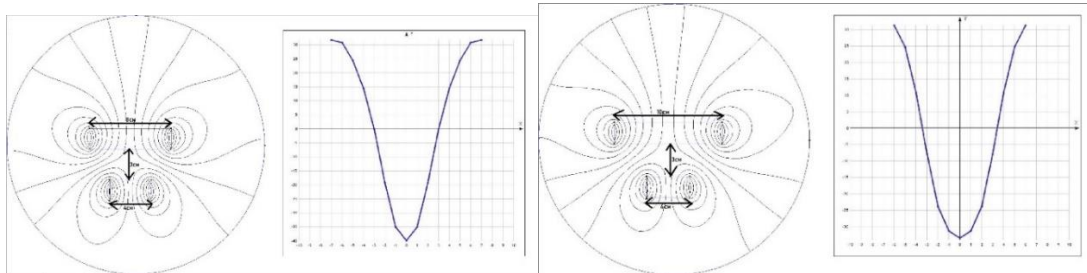
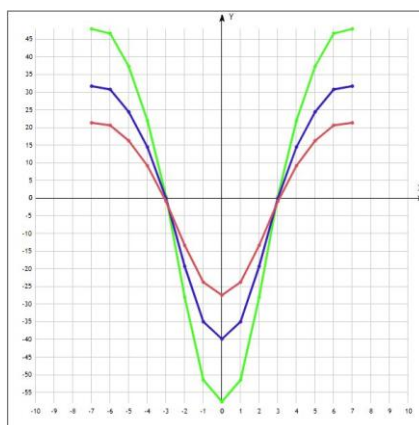


Рис. 3.18 Графік залежності

Рис. 3.19 Графік залежності

Рис 3.20
Загальний
графік



Видно, що графічна залежність змінюється за коефіцієнтами, та не змінює глобальний вигляд.

А от під час збільшення нижнього магніту, спостерігається цікава залежність.

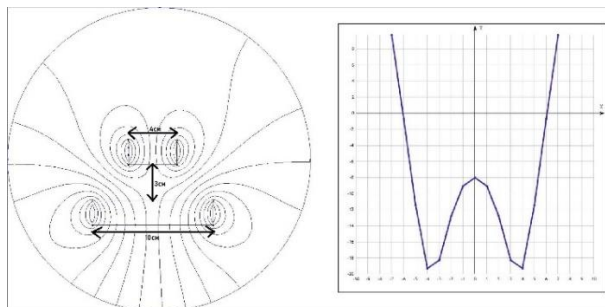


Рис.3.21 Нижній магніт більше

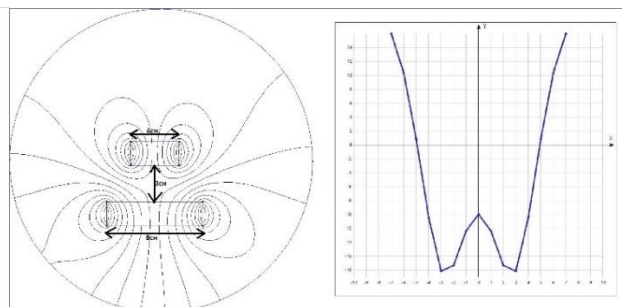


Рис. 3.22 Нижній магніт більше

А саме, що під зсуву відносно співпадання осей магнітві, сила відштовхування спочатку зростає і тільки потім знижується, переходячи у силу притягіння.

І загальний графік має вигляд:

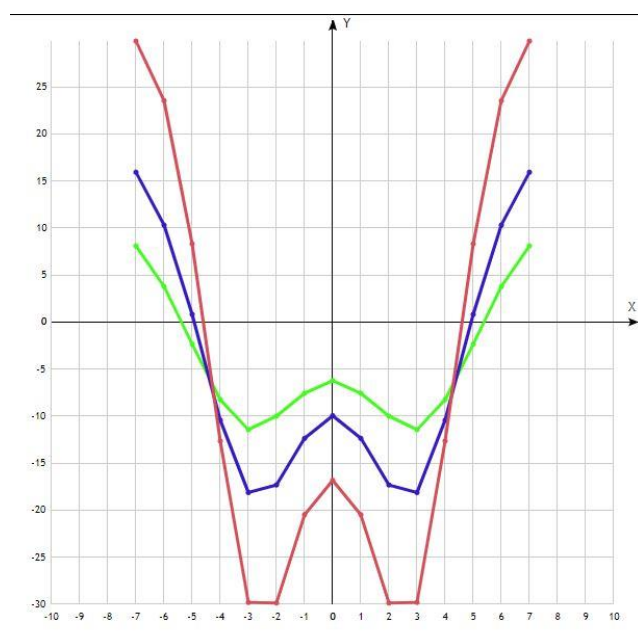


Рис. 3.23

Загальний графік

На цьому графіку, також видно, що графічна залежність змінюється за коефіцієнтами, та не змінює глобальний вигляд.

Для теоретичного розрахунку такої взаємодії, складемо задачу.

Знайти теоретичну залежність сили взаємодії двох постійних магнітів від відстані і порівняти з досвідом.

Дано: висота магніту d ; радіус магніту R .

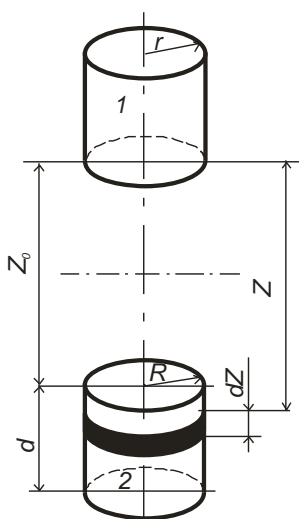


Рис. 3.24 Схема положення двох магнітів

$$I_{M_1} = I_{M_2} \left(\frac{A}{M} \right)$$

$$B_r = \mu_0 H_R;$$

Необхідно:

1. Для одного вимірюного значення сили Ампера знайти щільність сили струму I_m за формулою

2. За обчисленої щільності сили струму побудувати графік залежності сили взаємодії між магнітами для інших значень відстані між магнітами Z , вважаючи, що постійна для даного магніту і будемо теоретичну залежність за формулою (як на рис.2)

$$r = R \text{ (Розглядаємо струм на поверхні другого магніту)}$$

- магнітне поле, створене першим магнітом, діє на $I_M \cdot dz$ другого магніту

$r = R$ - радіус магніту для двох магнітів

$$H_R(z) = \frac{I_M R}{4\pi} \left\{ \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{z^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} - \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{(z+d)^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} \right\} \quad (3.1)$$

Сила Ампера, що діє на виділений елемент струму

$$dF_A = I_M dz \mu_0 H_R(z) dl = \mu_0 2\pi R I_M H_R(z) dz = \frac{\mu_0 2\pi R I_M \cdot I_M R}{4\pi} \cdot \left\{ \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{z^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} - \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{(z+d)^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} \right\} dz \quad (3.2)$$

інтегруючи по висоті d другого магніту, отримаємо силу Ампера $F_A = \int dF_A$

(силу взаємодії двох співвісних однакових постійних магнітів)

$$F_A = \int_{z_0}^{z_0+d} \frac{1}{2} I_M^2 \mu_0 R^2 \left\{ \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{z^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} - \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{(z+d)^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} \right\} dz =$$

$$\frac{1}{2} \mu_0 I_M^2 R^2 \int_{z_0}^{z_0+d} \left\{ \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{z^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} - \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{(z+d)^2 + R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \varphi}} \right\} dz \quad (3.3)$$

Після перетворень

$$F_A = \frac{1}{2} \mu_0 I_M^2 R^2 \int_{z_0}^{z_0+d} \left\{ \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{z^2 + 2R^2(1 - \cos \varphi)}} - \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi \cdot d\varphi}{\sqrt{(z+d)^2 + 2R^2(1 - \cos \varphi)}} \right\} dz \quad (3.4)$$

Для розрахунку приймаємо z згідно з результатами експерименту.

Зная обчислену густину сили струму I_M , побудуємо $F(z_0)$ для інших значень

z_0 . I_M - щільність струму, отримана в точці z_0 - точці зшивання експериментальної кривої (суцільна лінія) і теоретичної кривої (пунктир).

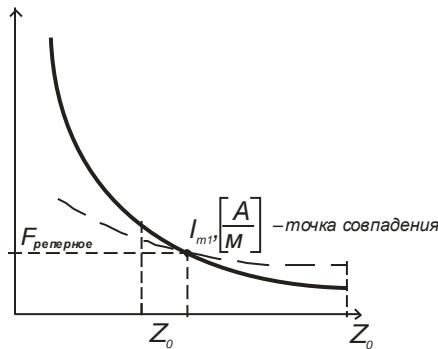


Рис. 3.25 Залежність сили від відстані

3.2 Дослідження та моделювання магнітного підвісу

Також, за допомогою середовища femm, достатньо легко моделювати моделі магнітного підвісу. Для початку створимо візуальну модель такої задачі, коли існує магнітний підвіс, що має вигляд:

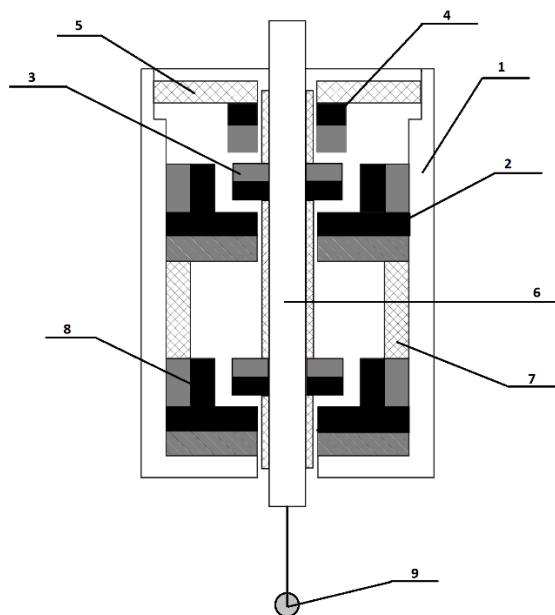


Рис. 3.26 Схема магнітного підвісу

де

1 – корпус, 2 - кільцеві магніти, що з'єднанні з корпусом, 3 - кільцеві магніти, що з'єднанні з валом, 4 - регулювальний кільцевий магніт, 5 - різьбова опора для регулювального магніту, 6 - немагнітний осьовий вал, 7 - немагнітна частина корпусу, 8 - радіальні кільцеві магніти, що з'єднанні з корпусом, 9 - вертикальний вантаж.

Магнітний підвіс працює наступним чином: до валу 6, вертикально приєднується вантаж 9. Магніти 2 і 8, закріплені на корпусі 1. Магніти 3, закріплені на осі обертання 6. Між магнітами 2 і 3, а також між магнітами 3 і 8 утворюється певний зазор. Зазор між магнітами 3 та магнітами 4, регулюється за допомогою різьбової опори, до якої прикріплений магніт 4. За рахунок того, що магніти 2 і 3, а також 3 і 8, розташовані, один до одного однойменними полюсами, між ними виникає відштовхувальна сила. Завдяки

тому, що магніти 8 мають радіальну намагніченість, бокова сила, що діє на магніти 3, дорівнює нулю. А відштовхувальна сила між магнітами 3 і 2, компенсує силу, з якою вантаж діє на вал. Регулювальна опора 5, разом, з магнітом 4, запобігають руйнуванню конструкції.

Змодельовавши дану конструкцію, з урахуванням магнітних властивостей.

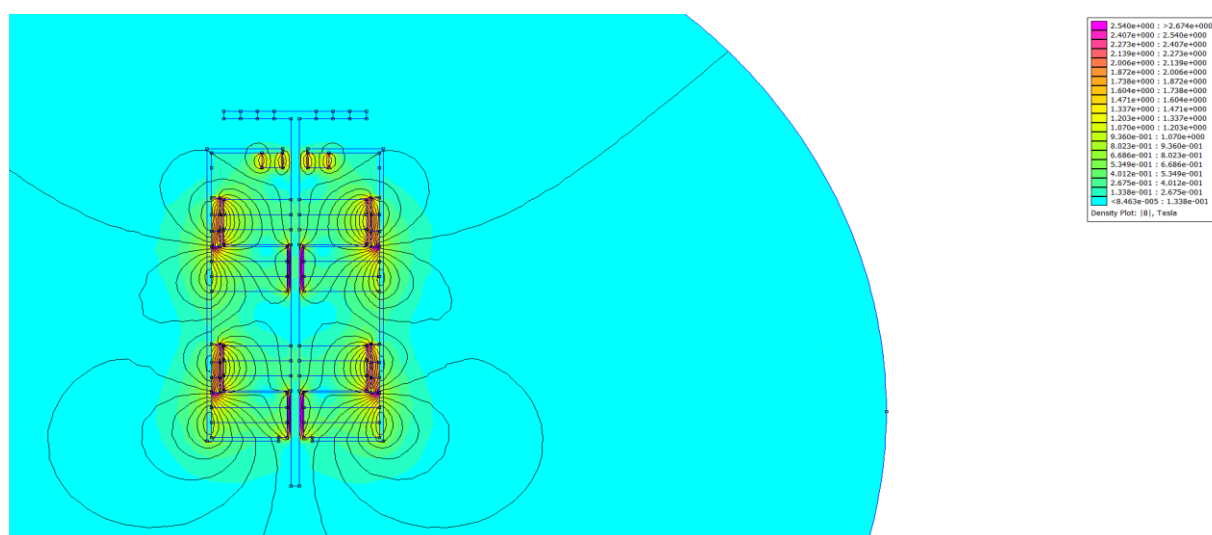


Рис. 3.27 Моделювання магнітного підвісу

Провівши певні розрахунки, можна зробити висновок, що бокові магніти, компенсують бокові зміщення магнітів, майже повністю, та мають максимальне бокове биття, з силою $F_{\text{макс}} = 0,003\text{Н}$.

Але така конструкція, за урахуванням формули (1-20) та отримавши результати вимірювання у середовищі Femm, виходить, що може тримати об'єкт підвісу, масою до 30 кг.

За рахунок накладання декількох магнітів, один на одного, можна досягти посилення відштовхувальної сили, що дасть змогу підвішувати вантажи, масою до 100кг.

Тому, таку конструкцію, можна використовувати, для підвісу маятника Фуко, наприклад.

Висновки до розділу III

Основним висновком даного розділу, є те, що після проведення практичного експерименту, для вивчення взаємодії постійних магнітів та проведення роботи по моделюванню даних магнітів у різних середовищах, а також побудови різних графіків, можна зробити висновок, що програма для комп'ютерного моделювання фізичних процесів дає цілком реальний та дійсний результат взаємодії, що підтверджується практичними показами. Всі ці розрахунки, легли в основу створення Лабораторної роботи для студентів, по вивченню взаємодії постійних магнітів. А також, дало поштовх для написання патенту, по закріпленню прав на корисну модель магнітного підвісу.

ВИСНОВКИ

На основі фізичних особливостей магнітних матеріалів, було створена комп'ютерна модель взаємодії магнітів, а також модель магнітного підвісу. Модель магнітного підвісу, можна охарактеризувати, як сукупність магнітів (або магнітна система), що за рахунок певного розташування, мають можливість компенсації відштовхувальних сил та левітують без тертя, та мають мінімальні биття у горизонтальних напрямках. Результати порівняні з експериментальними даними з літератури. В результаті зроблено наступні висновки.

- Встановлено, що для можливих моделей магнітних систем, слід використовувати лише високо коерцитивні магніти, адже магнітні сили є деже сильними, що може призвести до руйнування магніту.
- Отримано результат, що демонструє, що знаходження одного магніту над іншим, у стані спокою – неможливо. Що підтверджується теоремою Ірншоу.
- Якісно показано, що утримуюча сила (відштовхувальна сила), прямо пропорційно залежить від розмірів магніту, тобто від щільності магнітних диполів.
- Встановлено, що завдяки використанню магнітних підшипників (вертальна варіація магнітного підвісу), можна створювати різні пристрої, для передачі крутного моменту, без задіяння сил тертя. Що подовжить термін життя такої конструкції.
- Показано, що отримані результати якісно близькі до експериментальних даних аномальної дифузії в анізотропних рідинах (рідких кристалах).
- Розроблена патента заявка по темі магнітний підвіс та створена лабораторна робота, для студентів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. — Д. : Східний видавничий дім, 2004—2013.
2. Сергєєв П.В., Білецький В.С. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів переробки корисних копалин (практикум) – Маріуполь: Східний видавничий дім, 2016. – 119 с. ISBN 978 – 966 – 317 – 258– 3
3. Самарський А.А. Математичне моделювання: Ідеї, Методи, Приклади. - М. : Физматгиз, 2002.
4. Finite Element, URL: <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php>
5. Elcut для початку, URL: <https://elcut.ru/publications/monastyrev.pdf>
6. Ansys Maxwell, URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-maxwell>
7. Магниты и магнитные свойства вещества,
url: https://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/fizika/MAGNITI_I_MAGNITNIE_SVOSTVA_VESHCHESTVA.html
8. В.А. Акимов, В.А. Баришполец, Н.А. Махутов, М.И. Фалеев. Безопасность России. Национальная и международная безопасность. – М.: Знание, 2012. – 752 с.
9. Все об инвестициях и инновациях. Бизнес-справочник. – М.: АФОН, 2005. – 188 с.
10. И.В. Савельев. Курс общей физики. Книга 2. Электричество и магнетизм. – М.: АСТ, Астрель, 2008. – 336 с.
11. Е.И. Иванникова, Т.В. Иванникова, Г.В. Семенова. Барное дело. Учебник. – М.: Академия, 2004. – 352 с.
12. С.А. Лосев, С.Я. Уманский, И.Т. Якубов. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник в 3 томах. Том 1. Динамика физико-химических процессов в газе и плазме. – М.: Издательство МГУ, 1995. – 352 с.
13. И.Н. Иванова. Рисование и лепка. – М.: Академия, 2012. – 160 с.

14. Т.И. Трофимова. Курс физики. – М.: Академия, 2012. – 560 с.
15. Г.А. Бордовский, Ю.А. Гороховатский, А.Д. Суханов, Д.Э. Темнов. Курс физики. В 3 книгах. Книга 2. Физические основы электромагнитных явлений. – М.: Высшая школа, 2004. – 424 с.
16. А.Г. Калинин, В.В. Кульчицкий. Естественное и искусственное искривление скважин. – М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2006. – 640 с.
17. В.Л. Гинзбург, Л.М. Левин, Д.В. Сивухин, И.А. Яковлев. Общий курс физики. Сборник задач. В 5 томах. Книга 2. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, Лань, 2006. – 176 с.
18. В.Л. Гинзбург, Л.М. Левин, М.С. Рабинович, Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Сборник задач. В 5 книгах. Книга 5. Атомная физика. Физика ядра и элементарных частиц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, Лань, 2006. – 184 с.
19. А.И. Нетрусов, И.Б. Котова. Общая микробиология. – М.: Академия, 2007. – 288 с.
20. Э.Парселл. Электричество и магнетизм. Берклевский курс физики. – СПб.: Лань, 2005. – 420 с.
21. А.Н. Матвеев. Атомная физика. – М.: Оникс, Мир и Образование, 2007. – 432 с.
22. В.П. Милантьев. История и методология физики. – М.: Издательство Российского Университета дружбы народов, 2007. – 352 с.
23. Основы физики и биофизики. – М.: Бином. Лаборатория знаний, Мир, 2008. – 384 с.
24. Г.А. Зисман, О.М. Тодес. Курс общей физики. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. – СПб.: Лань, 2007. – 352 с.
25. Г.Е. Зильберман. Электричество и магнетизм. – М.: Интеллект, 2008. – 376 с.
26. В.М. Гладской, П.И. Самойленко. Физика. Сборник задач с решениями. – М.: Дрофа, 2008. – 288 с.

27. Т.В. Котырло, Г.Г. Спирин, В.В. Евстигнеев. Электричество и магнетизм. Практический курс физики. – М.: Высшая школа, 2008. – 448 с.
28. А.С. Кингсеп, Г.Р. Локшин, О.А. Ольхов. Курс общей физики. Основы физики. В 2 томах. Том 1. Механика. Электричество и магнетизм. Колебания и волны. Волновая оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 704 с.
29. К.К. Гомоюнов, М.Ф. Кесаманлы, Ф.П. Кесаманлы, А.И. Сурыгин. Физика. Толковый словарь школьника и студента. – М.: Проспект, 2010. – 496 с.
30. В.П. Сафронов, В.А. Ваган, Б.Б. Конкин. Физика. Краткий курс. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 256 с.
31. Н.И. Ширяева, С.И. Лучич. Задачи по общему курсу физики в вопросах и ответах. Электричество и магнетизм. – М.: Либроком, 2010. – 272 с.
32. А.В. Клиндер. Задачник по физике с элементами теории и примерами решения. – М.: Флинта, Наука, 2008. – 240 с.
33. А.Н. Матвеев. Электричество и магнетизм. – СПб.: Лань, 2010. – 464 с.
34. И.В. Григорьева. Италия в XX веке. – М.: Дрофа, 2006. – 272 с.
35. Н.И. Ширяева, С.И. Лучич. Задачи по общему курсу физики в вопросах и ответах. Электричество и магнетизм. – М.: Либроком, 2011. – 272 с.
36. Под редакцией Г.С. Ландсберга. Элементарный учебник физики. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 488 с.
37. Т.И. Трофимова. Руководство к решению задач по физике. – М.: Юрайт, 2011. – 272 с.
38. И.В. Савельев. Курс общей физики. В 5 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. – СПб.: Лань, 2011. – 348 с.
39. В.И. Демидченко. Физика. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2012. – 576 с.
40. М.Л. Каминский, В.М. Каминский. Монтаж приборов и систем автоматизации. – М.: Высшая школа, 2005. – 304 с.
41. Э.И. Гитис. Автоматика радиоустановок. – М.: Энергия, 1964. – 632 с.
42. Лоренцо Валла. Об истинном и ложном благе. О свободе воли. – М.: Наука, 1989. – 480 с.

43. И.И. Алиев. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. – М.: РадиоСофт, 2004. – 128 с.
44. М.И. Пыляев. Старый Петербург. – М.: ИКПА, 1990. – 498 с.
45. А.С. Глинка (Волжский). А. С. Глинка (Волжский). Собрание сочинений в трех книгах. Том 10. Книга 1. 1900-1905. – М.: Модест Колеров, 2005. – 928 с.
46. Джон Берд. Физика. От теории к практике. В 2 книгах. Книга 2. Электричество. Магнетизм. Теория, методы расчета, практические устройства. – М.: Додэка XXI, 2007. – 560 с.
47. М.Ди Специо. Занимательные опыты. Электричество и магнетизм. – СПб.: АСТ, Астрель, Харвест, 2008. – 160 с.
48. В.А. Малышев, А.Н. Головистикова, Л.Ю. Грудцына, А.А. Спектор. Постатейный комментарий к Федеральному закону от 24 апреля 2008 г. № 48-ФЗ "Об опеке и попечительстве". – М.: Деловой двор, 2008. – 184 с.
49. Джон Берд. Физика. От теории к практике. В 2 книгах. Книга 1. Механика, оптика, термодинамика. – М.: Додэка XXI, 2006. – 256 с.
50. А.Н. Чашин. Комментарий к Федеральному закону "Об опеке и попечительстве". – М.: Дело и Сервис, 2009. – 176 с.
51. Э.И. Гитис. Электрорадиоавтоматика. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1959. – 424 с.
52. Научное сообщество физиков СССР. 1950-1960-е и другие годы. Выпуск 2. – М.: Издательство Русской Христианской гуманитарной академии, 2007. – 752 с.
53. Оцуки Гэнтаку, Симура Хироюки. Удивительные сведения об окружающих (Землю) морях (+ CD-ROM). – М.: Гиперион, 2009. – 392 с.
54. Т.Г. Пивоварова, О.В. Кузнецова. Комментарий к Федеральному Закону "Об опеке и попечительстве". – М.: Дашков и Ко, 2010. – 256 с.
55. Л.И. Бройтман, Е.И. Краснова. Большая морская улица. – М.: ПапиРус, 1996. – 220 с.
56. Макс Планк. Введение в теоретическую физику. Теория электричества и

- магнетизма. – М.: Едиториал УРСС, 2010. – 184 с.
57. В.П. Черепанов, Е.И. Посысаев. Защита радиоэлектронной аппаратуры от электрических перегрузок. – М.: РадиоСофт, 2010. – 216 с.
58. Е.Ф. Макаров. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1150 кВ. Том 2. – М.: Энергия, 2008. – 624 с.
59. Джон Берд. Инженерная физика. В 2 книгах. Книга 1. Механика, оптика, термодинамика. – М.: Додэка XXI, 2011. – 256 с.
60. И.И. Дрига. Кабинетная система в общеобразовательной школе. – М.: Просвещение, 1981. – 190 с.
61. К.А. Кормановская. Антикварный рынок Петербурга (XVIII- первая половина XIX в.). – М.: Русско-Балтийский информационный центр "БЛИЦ", 2007. – 416 с.
62. Юджин Паркер. Беседы об электрических и магнитных полях в космосе. – М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. – 208 с.
63. А.Н. Шульгин, И.Л. Семенов, А.Д. Гудков. Opel Vectra A. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. – М.: Третий Рим, 2008. – 280 с.
64. А.Л. Никитин. Текстология русских летописей XI - начала XIV вв. Выпуск 4. Новгородское летописание XII - первой половины XIV в. – М.: Минувшее, 2011. – 312 с.
65. А.Н. Шульгин, К.Н. Гринев, И.Л. Семенов, А.Д. Гудков. Volkswagen Passat B3/B4. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту. – М.: Третий Рим, 2011. – 264 с.
66. И.Г. Иутин, Н.В. Кичигин, Г.В. Пахарева, М.В. Пономарев, А.С. Широбоков. Об охоте и сохранении охотничьих ресурсов и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации. Постатейный комментарий к Федеральному закону. – М.: Юстицинформ, 2011. – 296 с.
67. О.Д. Хвольсон. Популярные лекции об электричестве и магнетизме. – М.:

Либроком, 2012. – 256 с.

68. С.Б. Хацкель. Аллергология в схемах и таблицах. Справочник. – М.: СпецЛит, 2000. – 720 с.

69. И.О. Родин, Т.М. Пименова. Литература. Учебно-справочное пособие. – М.: Астрель, АСТ, Планета знаний, 2005. – 448 с.

70. С.В. Трубецкова. Физика. Вопросы - ответы. Задачи - решения. Часть 5, 6. Электричество и магнетизм. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 304 с.

Сивухин Д.В., Хайкин С.Э. и др. Сборник задач по общему курсу физики. В 5 томах. Книга 3. Электричество и магнетизм. – М.: ФИЗМАТЛИТ, Лань, 2006. – 232 с.

71. Ю.А. Кучерявый, И.В. Маев. Болезни поджелудочной железы. В 2 томах (комплект из 2 книг). – М.: Медицина, Шико, 2008. – 976 с.

72. И.В. Савельев. Курс общей физики. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – СПб.: Лань, 2008. – 500 с.

И.В. Романов, И.Б. Агафонова. Биология. Человек. 9 класс. – М.: ДРОФА, 2014. – 288 с.

73. А.Ю. Барановский, В.И. Симаненков. Домашнее лечение болезней сердечно-сосудистой системы. – М.: Диалект, 2005. – 352 с.

74. А.В. Хуторской, Л.Н. Хуторская, И.С. Маслов. Как стать ученым. Занятия по физике со старшеклассниками. – М.: Глобус, 2008. – 320 с.

75. И.С. Сидорова, И.О. Макаров, Н.А. Матвиенко. Внутриутробная инфекция. Ведение беременности, родов и послеродового периода. – М.: МЕДпресс-информ, 2012. – 160 с.

76. О.Д. Хвольсон. Об абсолютных единицах, в особенности магнитных и электрических. – М.: Либроком, 2012. – 170 с.

77. А.И. Коротяев, С.А. Бабичев. Медицинская микробиология, иммунология и вирусология. – М.: СпецЛит, 2006. – 772 с.

78. С.В. Пантюхов. А-Газ и система классификации физических величин. – М.: Либроком, 2013. – 128 с.

Додаток А (Патент)



МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ
ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

УКРАЇНА (19) UA (11) №№№№ (13) U
(51) МПК (2009)
F16C 32/04

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видаєт
ся під
відповідальність
власника
патенту

(54) МАГНІТНИЙ ПІДШИПНИК

1

2

(21) u200909205

(22) 07.09.2009

(24) 01.12.2019

(46) 01.12.2019, Бюл.№ 3, 2019 р.

(72) БРОДИН ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ, БАШКАТОВ
ОЛЕГ ВЛАДИСЛАВОВИЧ, ПЕКЛУН ВІТАЛІЙ
ФЕДОРОВИЧ

(73) БРОДИН ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ, БАШКАТОВ
ОЛЕГ ВЛАДИСЛАВОВИЧ, ПЕКЛУН ВІТАЛІЙ
ФЕДОРОВИЧ

(57) Магнітний підвіс, що складається з корпусу, осьового валу, рухомих магнітів, зв'язаних з віссю обертання та нерухомих магнітів, зв'язаних з корпусом, при цьому магніти виконані кільцеподібними з полюсами, зверненими в протилежні сторони.

Відрізняється тим, що підвіс містить механізм для вертикального регулювання та фіксації його та бокові магніти для горизонтальної фіксації.

Корисна модель належить до галузі машинобудування, зокрема до вузлів та деталей машин з використанням магнітних та електричних опор, а саме підшипників, і може бути використане в якості опор маховиків та валів.

Відома конструкція магнітних підвісок маховика, що включає як постійні магніти або магнітні системи, що мають арматури, так і електромагніти.

Недоліком такої конструкції є складність виконання та значні витрати електроенергії для живлення електромагніту.

Відомий магнітний підвіс, що містить вал, який змонтований у корпусі, за допомогою радіальних магнітних підшипників та осьових механічних опорів, та встановленої на валу рухомої ланки.

Недоліком є те, що такий підвіс розміщений горизонтально, а також, механічне тертя, що має місце в механічних опорах.

Найбільш близьким до заявленої корисної моделі є магнітний підвіс, який містить вал обертання, корпус, рухомі

магніти, які зв'язані з корпусом, та чергуються один з одним із зазорами, та магніти мають в розрізі форму трапеції.

Недоліком є те, що він не забезпечує точного регулювання осі у горизонтальному напрямку, та потребує точності при зборці.

В основу корисної моделі поставлена задача удосконалення магнітного підвісу за рахунок введення елементу механічного регулювання вертикального положення валу, що забезпечить вертикальну фіксацію валу.

Поставлена задача вирішується тим, що магнітний підвіс, складається з корпусу, осьового валу, рухомих магнітів, зв'язаних з віссю обертання та нерухомих магнітів, зв'язаних з корпусом, при цьому, магніти виконані кільцеподібними з полюсами, зверненими в протилежні сторони, та відрізняється тим, що підвіс містить механізм для вертикального регулювання, фіксації його та бокові магніти для горизонтальної фіксації.

Новим є те, що підвіс містить механізм для вертикального регулювання, фіксації його та бокові магніти для горизонтальної фіксації.

Сутність корисної моделі пояснюється

кресленням: на фігурі зображено магнітний підвіс, де

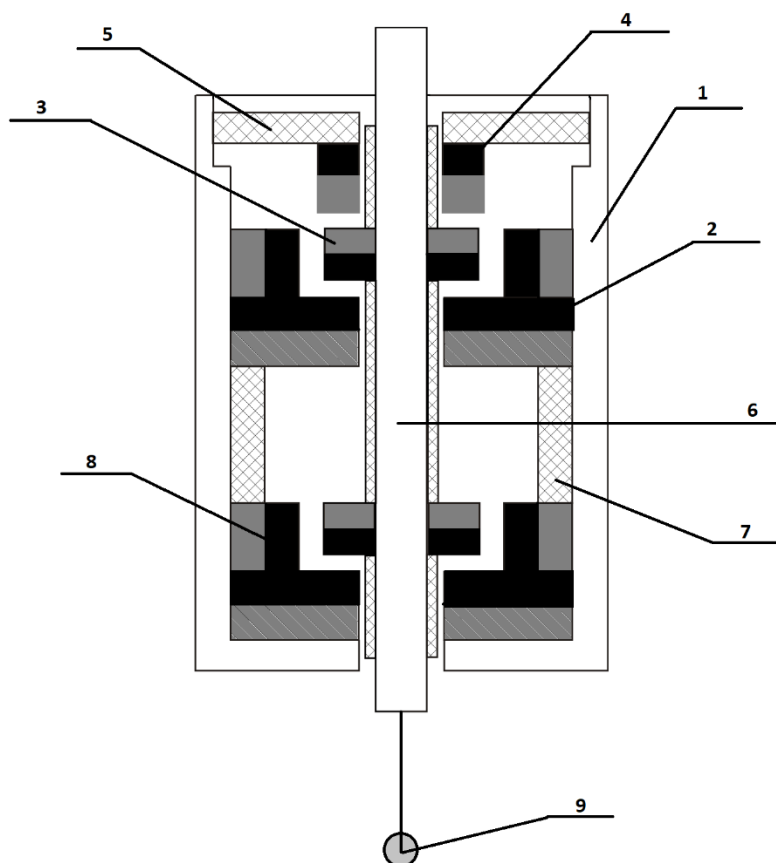
1 – корпус, 2 - кільцеві магніти, що з'єднанні з корпусом, 3 - кільцеві магніти, що з'єднанні з валом, 4 - регулювальний кільцевий магніт, 5 - різьбова опора для регулювального магніту, 6 - немагнітний осьовий вал, 7 - немагнітна частина корпусу, 8 - радіальні кільцеві магніти, що з'єднанні з корпусом, 9 - вертикальний вантаж

Магнітний підвіс працює наступним чином:

до валу 6, вертикально приєднується вантаж 9. Магніти 2 і 8 закріплені на корпусі 1. Магніти 3 закріплені на осі обертання 6. Між магнітами 2 і 3, а також між магнітами 3 і 8 утворюється певний зазор. Зазор між

магнітами 3 та магнітами 4, регулюється за допомогою різьбової опори, до якої прикріплений магніт 4. За рахунок того, що магніти 2 і 3, а також 3 і 8, розташовані, один до одного однойменними полюсами, між ними виникає відштовхувальна сила. Завдяки тому, що магніти 8 мають радіальну намагніченість, бокова сила, що діє на магніти 3 дорівнює нулю. А відштовхувальна сила між магнітами 3 і 2, компенсує силу, з якою вантаж діє на вал. Регулювальна опора 5 разом з магнітом 4, запобігають руйнуванню конструкції.

Заявлене технічне рішення може використовуватись у швидкохідних вузлах обертання.



Джерела інформації:

1. Джента Дж., «Накопление кинетической энергии», Москва, Мир, 1998, с.206-210, рис. 4.7, 4.9.
2. Авторське свідоцтво №875121 «Магнитный подвес», МПК F16C 32/04, опубліковане 23.10.1981
3. Патент України №47574 «Магнітний підшипник», МПК F16C 32/04, опублікований 10.02.2010

Додаток Б (Лабораторна робота)

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фізико-математичний факультет

Лабораторна робота № 12-1

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПОСТІЙНИХ
МАГНІТІВ**

Виконана студ. групи_____

Київ-2019

Лабораторна робота № 12-1

Мета роботи: ознайомитися з магнітними властивостями висококоерцитивних магнітів, вивчити залежність сили взаємодії двох магнітів циліндричної форми різних діаметрів і висот від відстані між магнітами, залежність індукції магнітного поля від відстані

Обладнання: установка для дослідження взаємодії магнітів, вимірювач магнітного поля, висококоерцитивних магніти різних діаметрів і висот

АНОТАЦІЯ
ДО ЗВІТУ З МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ
СТУДЕНТА ФМФ, 2 КУРСУ МАГІСТЕРСЬКОГО РІВНЯ ГР. ОФ-81мп
Башкатов Олег Владиславович

(ПБ)

На тему Комп'ютерне моделювання взаємодії високо коерцитивних магнітів у різних середовищах моделювання

Науковий керівник проф., д. фіз-мат. наук, Бродин Олександр Михайлович
 (науковий ступінь, вчене звання, посада, ПБ)

Актуальність На сьогоднішній день, магнітні системи, добре зарекомендували себе, як засіб полегшення фізичних впливів та зменшення сил тертя, що приводить до подовження ресурсу конструкції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри Взаємодія високо коерцитивних магнітів, фізика надпровідності, магнітна левітація, магнітні підшипники та підвіси.

Об'єкт дослідження Магнітні властивості взаємодії високо коерцитивних постійних магнітів.

Предмет дослідження Вплив різних, (за кількістю, за розмірами, за магнітними характеристиками) магнітних систем на взаємодію та комп'ютерне моделювання таких систем.

Мета роботи розробити модель системи постійних магнітів, за допомогою якого можна контролювати взаємодію між ними та створити умови для реалізації магнітного підвісу.

Методи дослідження науковий метод дослідження, аналітичне дослідження поставленої задачі і її моделювання за допомогою комп'ютерних програм фізичного моделювання.

Відомості про обсяг звіту, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних звіт містить 82 сторінки, 61 ілюстрацію, 2 додатки, та 79 використаних літературних найменувань

Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати
виробити вміння моделювати вивчений процес, розробити його аналітичний розбір та на основі отриманих результатів зробити власний висновок і продемонструвати своє вміння робити наукові умовиводи.

Висновок за результатами досліджень, розрахунки показали, що можна досягти зменшення горизонтального биття, та створити стабільний підвіс.

Перелік ключових слів (не більше 20) магніти, магнітне поле, левітація, магнітний підвіс, взаємодія магнітів.

Підпис керівника _____

SUMMARY

TO THE MASTER'S DISSERTATION REPORT

STUDENT OF FMF, 2 COURSE OF THE MASTER LEVEL, GR. OF-81mp

Bashkatov Oleg Vladislavovich

(FULL NAME)

On the topic Computer simulation of the interaction of highly coercive magnets in different simulation environments

Scientific supervisor Prof., Doctor of Phys. Sciences, Brodin Alexander Mikhailovich

(scientific degree, academic status, position, FULL NAME)

Topicality To date, magnetic systems have proven themselves as a means of alleviating physical effects and reducing friction, resulting in the extension of structural life.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes cathedra Interaction of highly coercive magnets, superconductivity physics, magnetic levitation, magnetic bearings and suspensions.

Object of research Magnetic properties of the interaction of highly coercive permanent magnets.

Subject of research Influence of different (by number, size, magnetic characteristics) magnetic systems on the interaction and computer simulation of such systems.

Purpose of work to develop a model of a permanent magnet system that can be used to control the interaction between them and create the conditions for the magnetic suspension.

Research methods scientific method of research, analytical research of a given task and its modeling by means of computer programs of physical modeling.

Information about the volume of the report, the number of illustrations, tables, applications and literary names in the list of used ones the report contains 82 pages, 61 illustrations, 2 appendices, and 79 literary titles.

The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained to develop the ability to simulate the studied process, to develop its analytical analysis and to draw its own conclusion and to demonstrate its ability to draw scientific conclusions.

Conclusion According to research, the calculations showed that a horizontal beating can be achieved and a stable suspension can be created.

Keyword list (no more than 20) magnets, magnetic field, levitation, magnetic suspension, interaction of magnets.

Signature of the head _____